THE UNIVERSITY
OF ILLINOIS
LIBRARY
621.86
St4lFm

Digitized by the Internet Archive
in 2015

https://archive.org/details/lescheminsdefera00step

LES

CHEMINS DE FER

AÉRIENS

Papier et Impression L. GEISLER

AUX CHATELLES

PAR RAON-L'ÉTAPE (VOSGES)

P. STEPHAN

LES CHEMINS DE FER AÉRIENS

LEUR CONSTRUCTION ET LEURS APPLICATIONS

TRADUIT DE L'ALLEMAND

PAR

A. MOREAU
INGÉNIEUR A. & M.

ÉDITION REVUE ET AUGMENTÉE

Avec 204 figures et 2 planches

PARIS
LIBRAIRIE DES SCIENCES ET DE L'INDUSTRIE
L. GEISLER, IMPRIMEUR-ÉDITEUR
1, Rue de Médicis, 1

1912

621.86
St4lFm

PRÉFACE

Le présent ouvrage a pour but de donner un aperçu général sur le transport des matériaux par chemins de fer aériens qui a pris une grande importance depuis une trentaine d'années.

Le développement de l'activité industrielle et le renchérissement continuel de la main-d'œuvre ont fait naître un besoin sans cesse croissant de manutentions le plus possible mécaniques. L'extension des transporteurs aériens a été particulièrement remarquable en Allemagne. Quoique leurs applications soient beaucoup moins répandues en France, ces appareils y sont cependant connus depuis fort longtemps. Si certains industriels leur préfèrent dans bien des cas des chemins de fer à voie étroite, c'est qu'ils ne se rendent pas compte que l'installation de la ligne seule est souvent plus onéreuse que celle d'un chemin aérien complet. D'autre part ces transporteurs permettent d'obtenir des départs et des arrivées mieux appropriés à la manutention et nécessitent des frais d'exploitation beaucoup moindres.

C'est une croyance erronée, généralement répandue, que les chemins de fer aériens ne sont avantageux que pour de longs trajets en ligne droite, trop accidentés pour permettre l'emploi d'un autre système. Les multiples applications à des cas spéciaux faites dans ces quinze dernières années détruiraient cette erreur, si elles étaient mieux connues.

281856

L'ouvrage que nous présentons permettra aux ingénieurs et aux chefs d'exploitation de comparer les chemins de fer aériens aux autres genres de transporteurs et de choisir le système le mieux approprié au but de l'installation et aux particularités locales. Les notes de calcul et les détails de construction les mettront en mesure d'établir un avant-projet, en prenant au besoin comme bases les installations décrites où figurent de nombreux renseignements.

Tous les perfectionnements apportés à la manutention aérienne, au cours de ces dernières années, sont consignés dans cette édition nouvelle, augmentée en outre d'un chapitre sur la fatigue réelle des câbles, pouvant servir non seulement aux constructeurs de transporteurs aériens, mais aussi à tous ceux qui fabriquent ou utilisent les câbles.

Nous adressons ici nos remerciements aux maisons qui ont bien voulu nous communiquer des renseignements et des descriptions de leurs constructions et qui ont contribué ainsi à l'intérêt de cet ouvrage.

Octobre 1911.

LES CHEMINS DE FER AÉRIENS

A. — GÉNÉRALITÉS

I. — Les premières installations et les différents systèmes de chemins de fer aériens.

1. Les anciens bicâbles et monocâbles. — On désigne sous le nom de chemins de fer aériens les transporteurs dans lesquels le dispositif de traction et les voies de roulement sont formés par un ou plusieurs câbles. Dans cet ouvrage nous nous occuperons uniquement de ces appareils, laissant de côté les funiculaires dont les voies sont formées par des rails reposant sur le sol et qui ne se distinguent des chemins de fer ordinaires que par leur commande à câble.

Les chemins aériens sont connus depuis fort longtemps, mais leur application pratique dans l'industrie date à peine d'une quarantaine d'années. Les quelques anciennes descriptions existantes de ces constructions nous montrent qu'elles n'offraient aucune des difficultés des installations actuelles et n'avaient de commun avec celles-ci que le nom. Ces transporteurs ne se sont développés qu'après l'invention des câbles en fils métalliques, et ce n'est qu'en 1834 que l'ingénieur des mines Albert à Clausthal confectionna à la main le premier câble avec des fils [1]. Leur construction industrielle fut entreprise trois ans plus tard par la maison Felten et Guilleaume à Cologne.

(1) Au musée de Naples il existe un morceau de câble en cuivre à trois torons et à enroulement croisé, trouvé dans les ruines de Pompéi.

Il y a plus de 1000 ans qu'il existe des transporteurs aériens avec câbles en fibres végétales en Chine, au Japon et dans les Indes, pour la traversée de rivières et de vallées profondes. G. Dieterich décrit, dans son livre « L'invention des chemins aériens », plusieurs de ces anciennes installations, très intéressantes.

A la bibliothèque de Vienne se trouve un manuscrit de Johann Hartlieb écrit en 1411, contenant la première description européenne de transporteur à câble, qui fut le point de départ des chemins de fer aériens.

Theodor Beck dans son livre « Histoire de la construction des machines » reproduit un croquis paru en 1430 dans un manuscrit de Marianus Jacobus Taccola (1). Cette installation était destinée à passer les bombardes au-dessus d'une rivière : un premier câble en chanvre supportant l'engin au moyen d'un anneau était fixé d'un côté à un arbre et de l'autre à un pieu ; un deuxième câble supérieur contournant une poulie fixée à l'arbre était attaché par l'une de ses extrémités à la bombarde et tiré à l'autre par une bête de trait.

Plusieurs chemins aériens furent projetés et construits pour le transport de terre destinée à l'établissement de fortifications. Dans son livre « Delle Fortificatione » paru en 1597, Buonaiuto Lorini décrit à la fin du chapitre 9 une installation dans laquelle un wagonnet ordinaire avec roues à gorge se déplace sur deux câbles tendus placés l'un près de l'autre, tiré au moyen d'un troisième câble et d'un treuil. Ce dispositif est naturellement très peu stable et ne peut être exécuté qu'avec beaucoup de précautions (2).

Le livre de Faustus Verantius paru vers 1617 à Venise contient un croquis d'un chemin aérien servant de transporteur pour personnes avec la description suivante (3) : « Une caisse (ou un panier) avec des poulies, suspendue à un gros câble transporte sans danger de l'autre coté des personnes qui tirent sur un second câble plus petit placé près du premier ».

L'ingénieur hollandais Adam Wybe construisit en 1644 à Dantzig une

---

(1) Beck. — *Histoire de la construction des machines*, page 246.
(2) Voir la reconstruction de G. Dieterich, page 21.
(3) Beck. — *Histoire de la construction des machines*, page 525.

voie aérienne décrite dans la chronique de Dantzig par R. Curicke. Un dessin découvert par J. Pohlig montre que cette installation destinée au transport de déblais, était formée par une seule corde en chanvre à laquelle étaient suspendus un grand nombre de seaux. La corde, mise en mouvement par un cabestan, était supportée sur son parcours par des poulies fixées à des poteaux très nombreux du côté des récipients pleins.

Jacob Leupold dans son ouvrage « Theatrum machinarum hydraulicarum » en 1714 représente par des croquis très clairs une installation avec certains détails qui ont été repris plus tard. La commande mécanique et le mouvement continu d'une série de bennes constituent un progrès remarquable sur les installations précédentes ; l'emploi d'un seul câble comme organe porteur et tracteur était au contraire un certain retour en arrière vis-à-vis du projet de Johann Harlieb.

Tant que l'on se servit de cordes en chanvre comme câbles tracteurs et comme voies de roulement, ces transporteurs ne purent naturellement être appliqués que pour des installations temporaires. On n'employa pendant bien longtemps qu'un genre de chemin aérien tout à fait primitif qui était destiné à descendre les troncs d'arbres et les blocs de pierre des montagnes. Les câbles étaient ancrés à la partie supérieure et tendus en bas par un treuil ; la voie entière était formée par une seule travée sans pylônes intermédiaires, et la charge glissait librement à l'aide d'étriers ou de légers wagonnets. A la partie inférieure elle était arrêtée par un dispositif approprié, formé souvent par des broutilles ou, dans les installations plus perfectionnées, par des rails inclinés. Lorsque tous les wagonnets étaient parvenus en bas, on les remontait par un sentier ou au moyen d'un petit câble et d'un treuil.

Actuellement on construit encore avantageusement de semblables installations primitives dans les régions exotiques, en se servant de vieux câbles ; on a ainsi des transporteurs dont les frais d'établissement sont très minimes. A la Nouvelle-Calédonie, on trouve généralement les minerais de nickel et de chrome sur les pentes des montagnes et l'on réunit très souvent par de tels chemins aériens les carrières ou galeries à un point central situé dans la vallée.

La longueur de ces transporteurs dépasse rarement 1 à 1 km. 2, leur débit est toujours très faible et ne dépasse ordinairement pas 20 tonnes

par journée de neuf heures. La pente la plus favorable est d'environ 1/5, lorsque l'inclinaison est plus petite, il arrive de temps à autre que la charge reste sur le parcours. Quand la hauteur est très importante, la vitesse devient trop grande et la charge est détériorée au moment du choc sur le dispositif d'arrêt ; il peut en résulter aussi une usure considérable de la partie inférieure des câbles et des rails inclinés, lorsqu'on les emploie. Dans le cas d'une faible pente, on peut compter que 7 % de la charge sont perdus lorsqu'un wagonnet reste sur le parcours et qu'un deuxième le rencontre.

L'inventeur des chemins de fer aériens, tels que nous l'entendons actuellement peut être considéré comme étant l'ingénieur des Mines De Ducker. Il construisit en 1861 à Oeynhausen un transporteur d'essai qu'il rendit public un peu plus tard. A noter que le transporteur d'Adam Wybe était inconnu de De Ducker, qui confectionna son chemin de roulement avec des barres en fer rond soudées bout à bout entre les pylônes ; la suspension des wagonnets était disposée latéralement pour permettre le passage des chevalets. L'installation n'avait qu'une voie et l'unique wagonnet existant était attaché au câble tracteur par une chaîne ou un dispositif analogue. Le tout formait ce que l'on désigne aujourd'hui sous le nom de voie suspendue à câble. Malgré tous ses défauts, ce transporteur dura dix ans jusqu'à ce qu'on fut arrivé à un but réellement pratique.

Dès 1868 l'ingénieur Cypher construisit dans la région minière du Colorado un chemin de fer aérien qui fut suivi peu après de plusieurs installations semblables ; ces transporteurs étaient à va-et-vient avec deux voies et un wagonnet sur chacune d'elles. En 1867 Hodgson inventa un transporteur absolument analogue à celui d'Adam Wybe : l'année suivante il prit un brevet pour ce dispositif qui reçut alors le nom de système anglais. Dieterich dans son ouvrage. « L'invention des chemins aériens » [1] pages 48 et 53 donne le texte complet de ce brevet avec les dessins et un tableau relatif à la première installation qui contient même une station d'angle. Le système anglais fut très vite introduit dans la pratique et le succès d'Hodgson amena en même temps quelques commandes à De Ducker. La figure 1 montre le profil longitudinal du premier transpor-

---

[1] *Die Erfindung der Drahtseilbahnen.*

teur construit par ce dernier à Osterode dans le Harz ; les hauteurs sont à une échelle 12 fois plus grande que les longueurs [1]. La voie de roulement était formée par des barres de fer rond de 26 millimètres soudées entre elles ; elle était fixée par la partie supérieure à un chevalet E placé dans la carrière de plâtre, et se terminait à l'autre extrémité par un morceau de câble enroulé sur le tambour d'un treuil, qui permettait de maintenir la tension constante. Pour obtenir automatiquement une certaine tension, il avait été suspendu à la voie entre les deux derniers chevalets en G un contrepoids formé par une caisse en bois remplie de pierres. La station de chargement était en L et le déchargement s'effectuait de l'autre coté en A et A_1. La longueur totale de E à W était de 447 mètres, tandis

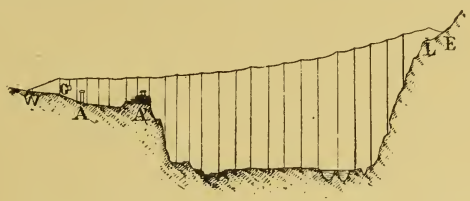


Fig. 1.

que la longueur utile de L à A_1 n'était que de 377 mètres. Cette installation qui est encore en fonctionnement est à voie unique et possède trois wagonnets contenant chacun 250 kilogrammes qui descendent seuls sans câble tracteur, de L en A. Les trois wagonnets une fois vides sont reliés entre eux ; le dernier est muni d'une corde qui permet de les ramener à la carrière de plâtre à l'aide d'un petit treuil.

Le premier transporteur du système allemand, c'est-à-dire formé de deux câbles porteurs et d'un câble tracteur sans fin à mouvement continu, a été installé par De Ducker en 1872 pour le transport des matériaux nécessaires à la construction des fortifications de Metz. Les wagonnets étaient fixés au câble tracteur par un accouplement à mâchoires ; la longueur de la ligne principale était de 1 923 mètres et la montée d'environ 41 mètres. Hodgson avait déjà décrit dans son brevet un chemin aérien à deux câbles, sans cependant donner aucune indication sur le dispositif d'accouplement et sur la façon d'obvier automatiquement aux

---

[1] *Deutsche Bauzeitung*, 1871, page 257.

inévitables variations de longueur des câbles. Cette dernière question fut d'ailleurs très imparfaitement solutionnée par De Ducker, et ce n'est qu'après plusieurs essais de l'installation que l'on obtint un bon fonctionnement (1). Il est à remarquer que l'accouplement à vis employé par De Ducker avait été décrit par Obach en 1870 dans une licence autrichienne. Cette invention était cependant restée secrète et n'avait pas été tout d'abord utilisée dans la pratique.

La même année où De Ducker construisait son transporteur, König installait à Schlierental, canton d'Unterwalden, un chemin aérien de montagne d'une longueur totale de 2 100 mètres avec une pente moyenne de 1 : 3, pour l'exploitation d'une forêt. Sur chaque câble porteur roulait un wagonnet fixé à un câble tracteur sans fin contournant dans la station inférieure une poulie-guide et dans la station supérieure une poulie combinée avec un frein. Malgré que ce chemin de fer aérien présentait une portée de 540 mètres, ses détails de construction étaient primitifs. Comme supports sur le parcours on avait utilisé les arbres existants sur lesquels on avait adapté, pour l'appui des câbles porteurs, des rouleaux analogues à ceux de Hodgson. Plus tard on s'aperçut que le mouvement continuel des rouleaux faisait sauter les câbles, et on les remplaça par des coussinets d'appui. Cette installation était très imparfaite et malgré la grande pente, la charge descendante devait être égale à trois fois celle qui montait si l'on voulait être assuré que les wagonnets ne s'arrêteraient pas sur le parcours de la ligne (2).

La plupart des premiers chemins de fer aériens furent très peu étudiés au point de vue technique, et seul Hodgson mit au point et construisit complètement les monocâbles. Les chemins de fer aériens du système allemand furent étudiés au point de vue fabrication pour la première fois par l'ingénieur Adolf Bleichert. Ses premiers dessins représentent la plupart des formes et dispositions des pièces employées encore de nos jours pour de faibles charges unitaires. Dieterich donne, dans son ouvrage « L'invention des chemins aériens » pages 88 et 89, la disposition d'un pylône de Bleichert avec un wagonnet muni d'un accou-

(1) Rapports publiés par Le comité d'Ingénieurs, fascicule 19, Berlin 1874.
(2) Fankhauser. — *Die Drahtseilriesen*, Bern 1873.

plement à excentrique et un coussinet d'appui avec un galet porteur. Bleichert obtenait la tension des câbles porteurs au moyen de contrepoids, et celle du câble tracteur comme le préconisent encore actuellement les constructeurs anglais [1]. Il construisit son premier chemin aérien en 1873 alors qu'il était ingénieur en chef de la Halle-Leipziger Maschinenbau A. G. à Schkeudiz. Peu de temps après, Bleichert et Otto quittaient la maison où ils travaillaient et créaient ensemble un bureau d'études pour la construction spéciale des chemins de fer aériens. Environ deux ans plus tard ils se séparaient : Bleichert restait seul à la tête d'une maison à Leipzig, et Otto fondait une nouvelle fabrique à Schkeuditz.

Dans une note intitulée « Schwebende Bahn bei Minden » parue à Leipzig en 1877, W. Mölle décrit une installation qu'il avait faite en 1876 pour le transport de pierres depuis une carrière jusqu'à la Weser. La ligne, d'une longueur de 920 mètres passait derrière la carrière au-dessus d'une élévation de terrain de 34 mètres de hauteur et présentait deux brisures. Les freins et le mouvement des trois sections étaient réunis par des trains d'engrenages disposés dans les angles et permettant ainsi de régler en même temps la vitesse de toute la ligne (fig. 2). Sur le parcours se trouvaient constamment dix wagonnets.

Les câbles tracteurs se terminaient par des œillets qui étaient simplement introduits dans des crochets fixés aux wagonnets. Pour accrocher et décrocher un wagonnet il fallait amener la section de ligne correspondante au repos, et l'installation nécessitait de ce fait 15 ouvriers. L'économie de personnel, qui est aujourd'hui une question capitale pour un transporteur, n'avait pas autrefois la même importance. Le profil longitudinal et la division des pylônes, qui avaient été obtenus par tâtonnements sur une reproduction au 50°, correspondent presque complètement aux tracés modernes. La charge maximum était de 1 500 kilogrammes et le câble en acier avait un diamètre de 23 millimètres.

L'étude des chemins de fer aériens fut donc faite en Allemagne par les deux maisons spécialistes Ad. Bleichert et C° et Th. Otto et C° en même temps que par Neyret-Brénier en France ; J. Pohlig à Cologne

---

[1] Voir fig. 58, page 97.

n'entreprit la construction de ces appareils qu'en 1880. Actuellement, on peut considérer que l'Allemagne est la première nation pour ce genre de transporteurs.

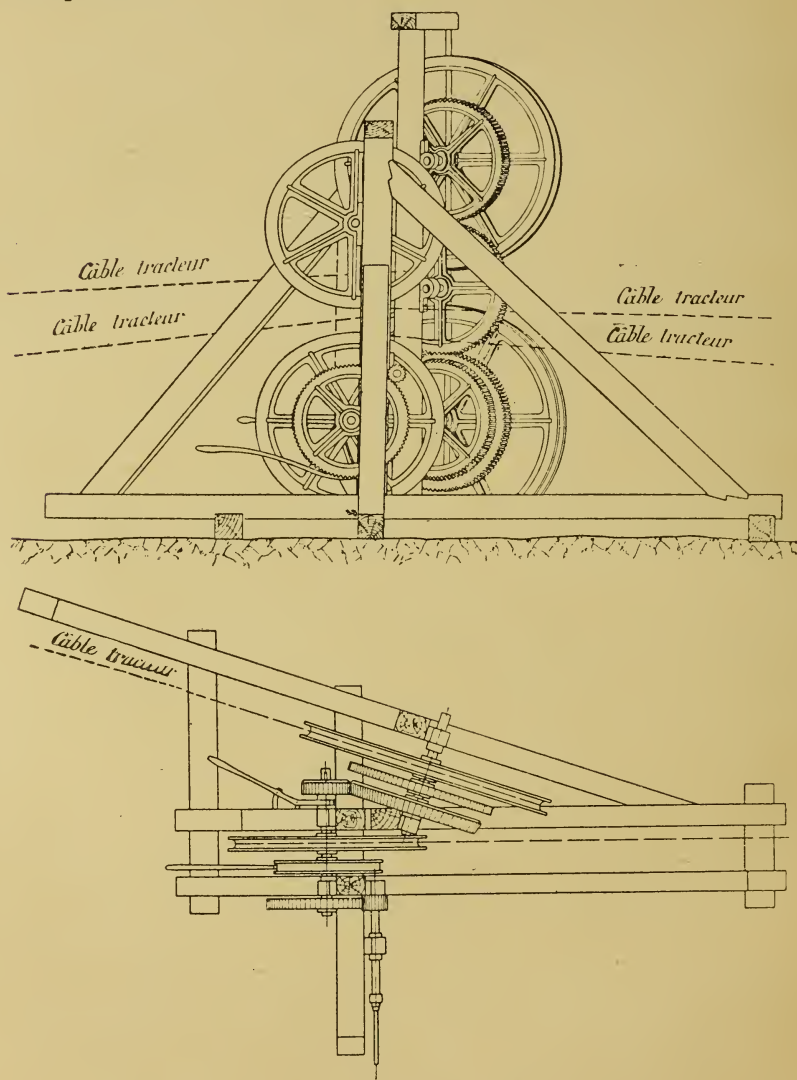


Fig. 2.

Les monocâbles d'Hodgson sont surtout avantageux dans le cas d'un faible débit et pour des terrains assez réguliers ; toutefois ces transporteurs,

perfectionnés depuis 1890 par Roe, peuvent fonctionner avec un débit assez considérable et remplacer parfois avantageusement les bicâbles plus coûteux comme installation.

2. Les Blondins. — Les constructions appelées Blondins ou ponts roulants à câbles ne sont qu'une variante des chemins de fer aériens; ces installations, dont les frais d'établissement sont peu élevés, sont employées pour desservir les carrières, les chantiers de construction et les dépôts. Elles portent le nom de l'Américain qui traversa le Niagara sur un câble d'acier, et furent construites pour la première fois vers 1890 en Amérique ; elles peuvent remplacer dans bien des cas les ponts roulants lourds et coûteux. Un blondin est formé par un câble porteur supporté par deux pylônes, ancré à une extrémité et tendu par un dispositif placé à l'autre; sur cette voie de roulement se déplace un chariot commandé par un câble tracteur sans fin, tandis qu'un deuxième câble commande la levée et la descente d'une moufle suspendue au chariot. On peut soulever des charges allant jusqu'à 5 000 kilogrammes et atteindre assez facilement un débit de 1 000 tonnes par journée de 10 heures.

3. Telphérage; voies suspendues électriques. — Dans les premières années du développement des tramways électriques, plusieurs ingénieurs anglais donnèrent une disposition d'après laquelle tout un train de légers wagonnets se déplaçait sur de forts câbles porteurs, entraîné par le wagon de tête qui était muni d'un moteur et d'une commande électriques. Le courant était amené au moteur par des fils tendus placés près des câbles porteurs et une prise de courant par contact. Les trains n'étant pas surveillés sur le parcours on devait prévoir des dispositifs de sécurité pour éviter qu'un train rencontre le dernier wagonnet du convoi précédent. On fut conduit ainsi à mettre à chaque pylône un interrupteur avec fils spéciaux qui compliquèrent l'installation et en augmentèrent les causes de dérangement [1].

---

[1] L'ouvrage de Wallis-Tayler, *Aerial or Wire-rope Tramways*, Londres, renferme plusieurs schémas des premières installations d'interrupteurs.

Pour cette raison, ce genre de transporteur fut abandonné et c'est depuis une dizaine d'années seulement que les voies suspendues électriques furent reprises par la Société « United Telpherage Company » de New-York avec un système considérablement simplifié, pour le transport dans les fabriques et les dépôts. Lorsque la voie est très courte et sans aiguillage, on emploie souvent un seul wagonnet avec treuil servant également de monte-charges.

Le premier essai de voies suspendues électriques en Europe, fait par la maison Menck et Hambrock à Altona, ne donna pas un résultat bien satisfaisant. Ce fut seulement lorsque Ad. Bleichert et C° en entreprirent l'étude et la construction qu'elles prirent rapidement une grande extension. Après avoir obtenu des moteurs appropriés et des interrupteurs suffisamment simples et sûrs, ils purent lancer sur une même voie le nombre voulu de wagonnets, la marche de ceux-ci étant réglée automatiquement.

La construction de ces transporteurs dans leurs détails est tout à fait différente de celle des chemins de fer aériens, aussi nous n'approfondirons pas leur étude dans le présent ouvrage.

II. — Les câbles et leurs raccords.

1. Les câbles spiroïdaux. — Comme il a été dit dans le premier chapitre, en vue d'obtenir une installation bon marché, les voies de roulement des premiers transporteurs aériens étaient formées par des barres de fer rond soudées entre elles. La faible résistance du fer ainsi employé était encore diminuée de 30 % par les soudures des différentes sections, aussi les voies de roulement ne pouvaient-elles être que très peu tendues, de sorte que pour éviter une flèche trop grande sous l'action d'une charge un peu lourde on ne devait pas dépasser 20 mètres comme distance entre deux pylônes consécutifs.

Pour obvier à cet inconvénient on employa plus tard, lorsque le capital d'installation le permit, des câbles en fils d'acier, de la construction

spiroïdale représentée par la figure 3. La résistance à la rupture des fils était de 5500 à 6000 kilogrammes par centimètre carré. Au début ces câbles résistèrent peu de temps car les fils qui les composaient étaient formés par des sections de faible longueur soudées entre elles. Il arrivait alors souvent qu'un fil cassait à une soudure, où il avait une résistance très réduite, pour se dérouler ensuite sur plusieurs mètres de longueur de chaque côté de la brisure et occasionner des déraillements et des arrêts dans le fonctionnement de l'installation. Dans le but d'éviter ceci on construisit des câbles spiroïdaux de faibles longueurs mais sans soudures de fils et pour former une voie continue on réunit les différents tronçons entre eux par des accouplements spéciaux.

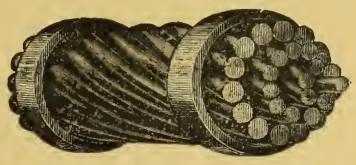


Fig. 3.

Aujourd'hui ces câbles métalliques de faible résistance sont presque complètement abandonnés, et on emploie surtout des câbles en acier fondu de 12000 à 14500 kilogrammes de résistance à la rupture par centimètre carré.

Pour de faibles charges unitaires, un câble spiroïdal à 19 fils suffit. Lorsqu'on est conduit à employer des câbles de diamètre assez élevé, on adopte la construction à 37 fils, car si l'on veut éviter que par suite de l'étirage la matière des fibres intérieures reste plus douce que celle des fibres extérieures il ne faut pas les prendre de plus de 6 millimètres de diamètre. D'un autre côté on ne descend qu'exceptionnellement au-dessous de 4 millimètres, à cause de l'usure des câbles sur leur partie extérieure. Ces deux raisons ont conduit à la construction intermédiaire à 33 fils, (fig. 4) formée par un câble à 19 fils autour duquel on a enroulé 14 autres fils de diamètre plus grand.

Fig. 4.

Les tableaux ci-après donnent les dimensions principales des câbles spiroïdaux encore employés, construits par la firme Felten et Guilleaume. Ordinairement, au contraire de la figure 3, on fait l'enroulement d'une couche de fils en sens inverse de celui des deux couches voisines, de sorte que les câbles ainsi construits ne tendent pas à se dérouler

Câbles spiroïdaux à 19 fils

Diamètre d en mm	Diamètre du fil δ en mm	Section F en cm²	Poids du mètre q en kgs	Longueur maximum en m
15	3	1,34	1,13	600
16	3,2	1,53	1,28	600
17	3,4	1,72	1,45	600
18	3,6	1,94	1,63	580
19	3,8	2,15	1,83	520
20	4,0	2,39	2,0	470
21	4,2	2,64	2,21	430
22	4,4	2,89	2,42	390
23	4,6	3,16	2,65	350
24	4,8	3,44	2,90	320
25	5,0	3,73	3,13	300
26	5,2	4,04	3,40	280
27	5,4	4,35	3,65	260
28	5,6	4,68	3,95	235
29	5,8	5,02	4,25	220
30	6,0	5,37	4,55	205

Câbles spiroïdaux à 37 fils

Diamètre d en mm	Diamètre du fil δ en mm	Section F en cm²	Poids du mètre q en kgs	Longueur maximum en m
27	3,85	4,31	3,65	490
28	4,0	4,64	3,9	450
29	4,14	4,98	4,2	420
30	4,28	5,32	4,5	390
31	4,42	5,68	4,8	370
32	4,57	6,07	5,1	340
33	4,71	6,45	5,45	320
34	4,85	6,84	5,75	310
35	5,0	7,26	6,1	290
36	5,14	7,68	6,45	270
37	5,28	8,10	6,85	260
38	5,42	8,56	7,2	250
39	5,57	9,02	7,6	230
40	5,71	9,47	8,0	220
41	5,85	9,94	8,4	210
42	6,0	10,45	8,8	200

comme celui représenté par cette figure. Il est encore à remarquer que l'on ne fabrique pas de fils au-dessus de $5^{mm},2$ en qualité très dure, résistant à 14500 kilogrammes par centimètre carré. La maison susnommée fait ses câbles avec des fils dont le poids unitaire varie de 49 à 50 kilogrammes pour les câbles à 19 fils et de 47 à 48 kilogrammes pour ceux à 37 fils, ce qui donne les longueurs maxima sans soudure, indiquées dans la dernière colonne des tableaux. Les autres constructeurs fabriquent en général leurs câbles avec des fils d'environ 40 kilogrammes, donnant ainsi des longueurs de 16 à 20 % inférieures à celles marquées dans les tables.

La section totale d'un câble spiroïdal en centimètres carrés est :

$$F = 0{,}598\,D^2$$

pour les câbles à 19 fils, et

$$F = 0{,}592\,D^2$$

pour les câbles à 37 fils.

D, étant le diamètre extérieur du câble en centimètres.

5. Câbles clos (ancienne construction). — Le contact des roues de wagonnets et des câbles de construction spiroïdale s'effectue sur une très faible surface ; un fil extérieur brisé sort facilement de sa position et de plus l'eau de pluie pénètre à l'intérieur du câble et séjourne dans ses grands vides occasionnant ainsi malgré l'huile une couche de rouille qui ronge peu à peu le métal sans que l'on puisse s'en apercevoir.

On évite ces trois inconvénients en employant des câbles de construction « close », tels que ceux de la maison Felten et Guilleaume représentés en vue extérieure et en coupe par les figures 5 et 6. Ces câbles sont caractérisés par une couche extérieure de fils en forme de S et une couche moyenne formée par des fils à section en coin, qui protègent à elles deux d'une façon absolument étanche le noyau central en fils ronds. A diamètres égaux, les câbles de construction close offrent une section utile beaucoup plus grande que les câbles spiroïdaux ; elle est généralement égale à 0,87 de la section totale $\frac{\pi d^2}{4}$.

A cause de leur forme spéciale nécessitée par l'enroulement, les fils des câbles clos ne peuvent pas être étirés aussi résistants que les fils

ronds des câbles spiroïdaux : aussi les câbles clos ne sont-ils livrés qu'en acier doux ayant une résistance à la rupture de 5 500 à 6 000 kilogrammes par centimètre carré, en acier coulé spécial avec une résistance à la rupture de 9 000 à 10 000 kilogrammes par centimètre carré, et en acier extra résistant de 12 000 kilogrammes par centimètre carré. Par suite de sa section utile relativement grande, un câble clos de 12 000 kilogrammes de résistance à la rupture par centimètre carré possède à peu près la même résistance à la traction qu'un

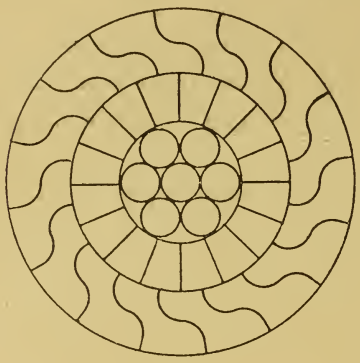


Fig. 5.

Fig. 6.

câble spiroïdal de même diamètre et de 14 500 kilogrammes de résistance à la rupture par centimètre carré.

Le tableau ci-dessous contient les données principales des câbles clos à surface lisse et fils enclavés de la maison Bailly, Chaudouet, Desvoyod et Cie de Bourg-en-Bresse.

Diamètre du câble en mm	Poids approximatif par mètre courant en kgs	Résistance à la rupture pour une résistance moyenne de	
		90 à 100 kgs par mm²	120 kgs par mm²
20,0	2,375	24 700	29 600
22,5	3,010	32 300	37 500
25,0	3,710	38 600	46 300
27,5	4,480	46 700	56 000
30,0	5,350	55 500	66 500
32,5	6,275	65 300	78 200
35,0	7,280	76 000	91 000
37,5	8,350	87 000	104 200
40,0	9,515	98 400	118 000
42,5	10,720	111 500	133 500
45,0	12,050	125 000	150 000

Dans ces câbles la cassure d'un fil est sans importance, attendu que celui-ci est retenu par les fils voisins et ne peut pas se dérouler ; il n'est donc pas nécessaire comme dans les câbles spiroïdaux d'éviter les soudures. La longueur des tronçons dépend alors uniquement des moyens de transport que l'on a à sa disposition : on les prend généralement de 2 500 kilogrammes.

Actuellement on emploie presque toujours des câbles de construction close comme voie de roulement des wagonnets chargés lorsque la charge utile dépasse 300 kilogrammes ou lorsque les wagonnets se suivent à de faibles distances. Quand la ligne présente des passages brusques au-dessus d'élévations de terrains, le câble tracteur tire de chaque côté du wagonnet et augmente ainsi considérablement la pression des roues, aussi emploie-t-on dans ce cas exclusivement des câbles à surface lisse. Lorsqu'on employait pour ces passages des câbles spiroïdaux, on avait soin de les protéger en les recouvrant par des rails protecteurs en fonte que l'on changeait de temps à autre.

Dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsqu'on a une vallée à traverser et que la voie doit suivre autant que possible la configuration du terrain, les câbles de construction close sont très avantageux car ils prennent d'eux-mêmes sous l'action de leur poids propre élevé une flèche plus grande que les câbles spiroïdaux de même résistance.

6. Câbles Simplex. — Avec les câbles clos on ne peut pas constater une cassure des fils intérieurs, même par un examen très attentif. Pour éviter cet inconvénient Ellinger construisit un câble dit « Simplex » avec une seule rangée de fils (voir fig. 7).

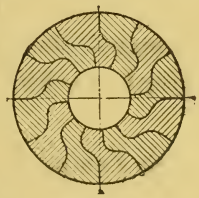


Fig. 7.

Ce câble possède en plus des avantages des câbles clos, celui d'avoir tous ses fils dans la même position par rapport à son axe et par suite soumis à la même fatigue, tandis que dans les autres constructions les fils extérieurs sont allongés par les charges roulantes et au bout d'un certain temps les fils de l'âme supportent une grande partie de la tension du tendeur. La durée des câbles creux n'a pas été cependant aussi grande que l'on s'y attendait. Pour obtenir une section suffisante on devait pren-

dre un diamètre relativement grand et les fils étaient plus gros que ceux en S des câbles clos, leur section allait jusqu'à 11 millimètres de hauteur et $2^{mm},6$ de largeur à la partie interne. Par suite des grands efforts de flexion auxquels sont soumis les câbles pendant le fonctionnement de l'installation, la partie intérieure des fils est soumise à une très grande fatigue et se détériore assez rapidement. Aux appuis sur les pylônes les câbles creux s'aplatissent souvent sous l'action des grands efforts verticaux qu'ils ont à supporter. Ces différents inconvénients ont fait délaisser complètement les câbles Simplex.

7. Câbles clos (nouvelle construction). — Pour éviter les inconvénients des câbles précédents on a diminué la hauteur de la section des fils et rempli la partie intérieure par plusieurs couches de fils ronds.

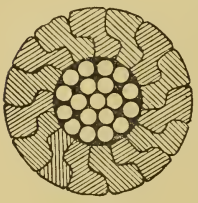


Fig. 8.

On a été ainsi amené aux câbles clos employés actuellement et dont la construction ne diffère de l'ancienne que par la suppression des fils à section en coin et par l'emploi de fils ronds intérieurs d'un diamètre un peu plus grand que ceux des premiers câbles (fig. 8). La section utile est dans ce cas en moyenne de 20 % inférieure à la section totale $\frac{\pi d^2}{4}$. Les caractéristiques nécessaires dans la pratique sont données par le tableau ci-après d'après la construction de Bailly, Chaudouet, Desvoyod et C°.

On remédie à la fatigue croissante des fils intérieurs en prévoyant ceux-ci un peu plus durs avec une résistance à la rupture d'environ 10 % plus grande que celle des autres.

8. Câbles demi-clos. — La fabrication des fils à section en S, difficile et coûteuse, devient même impossible lorsqu'ils atteignent certaines dimensions. Cette raison a conduit les constructeurs de câbles à la forme représentée par la figure 9, appelée construction demi-close. Elle se compose d'un câble spiroïdal à une ou deux rangées de fils ronds de diamètre relativement grand, autour duquel se trouve enroulée une

Câbles clos à surface lisse et fils enclavés

Diamètre du câble en mm	Poids approximatif par mètre courant en kgs	Résistance à la rupture correspondant à des résistances unitaires de	
		90 à 100 kgs par mm²	120 kgs par mm²
20,0	2,275	24700	29600
22,5	2,880	32300	37500
25,0	3,550	38600	46300
27,5	4,300	46700	56000
30,0	5,120	55500	66500
32,5	6,025	65300	78200
35,0	6,980	76000	91000
37,5	8,000	87000	104200
40,0	9,110	98400	118000
42,5	10,275	111500	133500
45,0	11,540	125000	150000

couche extérieure de fils qui sont alternativement ronds et de forme spéciale comme l'indique la figure 9.

Les premiers câbles de ce genre de construction furent fabriqués en 1884 par Latch et Bachlor à Manchester, lesquels furent suivis peu de temps après par la maison Teste, Moret et Cie de Lyon ; ces derniers construisaient toutefois leurs câbles avec une ou deux couches de fils à section en coin comme le montre la figure 10. Cette construction demi-close ne fut vulgarisée en Allemagne que beaucoup plus tard pour raison de brevet.

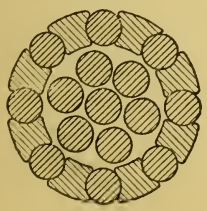


Fig. 9.

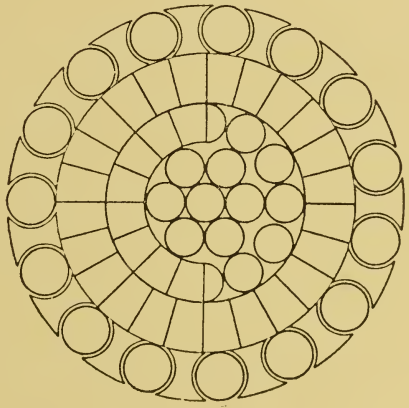


Fig. 10.

Les fils de la couche extérieure ont l'inconvénient de ne pas être tous

soumis aux mêmes fatigues. Ces câbles sont considérablement meilleur marché que ceux avec fils à section en S tout en ayant une section utile de fils presque aussi grande, aussi sont-ils très employés dans la construction des chemins de fer aériens. La maison Felten et Guilleaume construit ces câbles avec une résistance de 9 500 kilogrammes et 12 000 kilogrammes par centimètre carré. Le tableau ci-dessous donne leurs principales caractéristiques.

Câbles demi-clos

Diamètre du câble d en mm	Section F en cm²	Poids par mètre q en kgs
20	2,59	2,3
21	2,78	2,5
22	3,09	2,8
23	3,33	3,0
24	3,64	3,3
25	3,94	3,5
26	4,31	3,9
27	4,69	4,1
28	5,05	4,4
29	5,51	4,7
30	5,84	5,0
31	6,17	5,3
32	6,63	5,7
33	7,15	6,2
34	7,53	6,5
35	7,77	6,7
36	8,29	7,1
37	8,82	7,6
38	9,16	7,9
39	9,68	8,3
40	10,48	9,1

9. Raccords. — Les différents tronçons de câble sont réunis entre eux par des manchons d'accouplement dont l'enveloppe extérieure est en acier afin de déformer le moins possible la voie de roulement des wagonnets. Le genre de construction le plus employé est représenté par la figure 11. Pour effectuer un raccordement on introduit l'extrémité de chaque câble spiroïdal dans un demi-manchon, on écarte les fils, on nettoie, sans employer d'acides toutefois, on remplit ensuite la douille

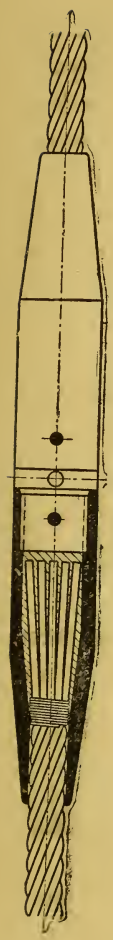


Fig. 11.

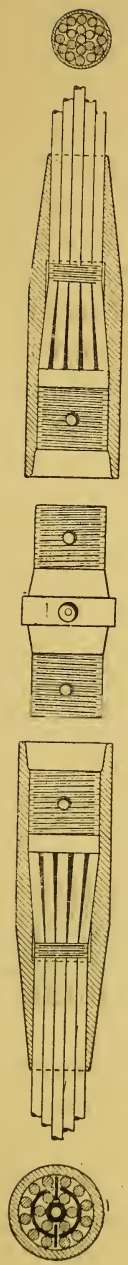


Fig. 12.

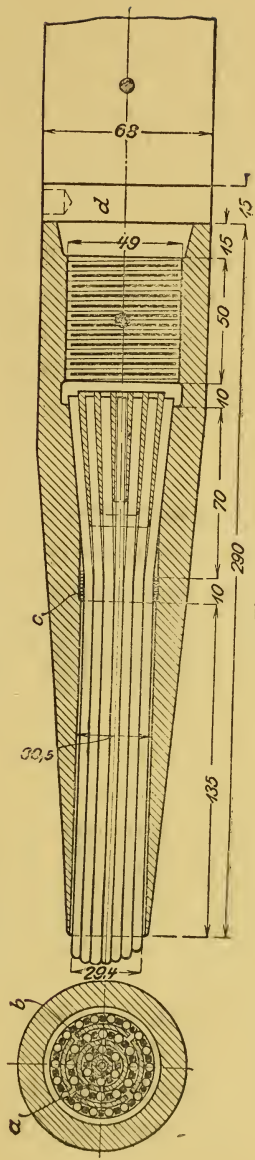


Fig. 13.

préalablement chauffée par un alliage suffisamment résistant. Les deux extrémités étant ainsi préparées, on les réunit au moyen d'un écrou portant un filetage à droite et un à gauche ; cet écrou est maintenu en place par deux goupilles qui traversent les deux demi-douilles. L'assemblage de deux tronçons de câbles clos s'opère de la même façon.

La maison Ad. Bleichert et Cie évite l'emploi d'alliage en maintenant les fils le long des parois intérieures du manchon au moyen de cales circulaires en acier, enfoncées à force entre chaque rangée de fils ; dans le cas de câbles de grand diamètre elle construit ces cales en deux ou plusieurs parties, lesquelles sont encore parfois écartées l'une de l'autre par de petits coins plats. La figure 12 montre une construction de ce genre pour un câble spiroïdal à 19 fils et la figure 13 pour un câble à 37 fils [1]. Le poids d'un accouplement intermédiaire est de 7 à 9 kilogrammes.

10. Câbles tracteurs. — Les câbles tracteurs généralement employés sont à torons. Dans les monte-charges, grues, ponts roulants, etc., on

Fig. 14.

emploie des câbles croisés souples dans lesquels l'enroulement des torons est en sens inverse de celui des fils, afin d'empêcher la charge de

Fig. 15.

tourner (fig. 14). Pour les chemins de fer aériens on emploie presque exclusivement des câbles appelés du nom de leur inventeur, du type « Albert », dans lesquels l'enroulement des torons et celui des fils sont dans le même sens (fig. 15). Les câbles de cette dernière construction offrent une surface extérieure beaucoup plus unie que ceux de la pre-

[1] Z. d. V. d. Ing., 1902, p. 1771 (*Journal de la Société des ingénieurs allemands*).

mière, de sorte qu'ils résistent mieux à la pression des mâchoires d'accouplement des wagonnets et détériorent moins la garniture de cuir des poulies motrices.

Les câbles tracteurs sont toujours en acier fondu au creuset d'une résistance à la rupture de 12 000, 16 000 ou 18 000 kilogrammes par centimètre carré. On prend le diamètre des câbles et des fils aussi petit que possible à cause des fatigues de flexion déterminées par le passage des poulies-guide et motrices ; le diamètre de ces poulies étant préalablement fixé on est conduit à employer pour la confection de ces câbles un métal à grande résistance.

Dans la plupart des cas on emploie des câbles tracteurs à 42 fils c'est-à-dire 6 torons de 7 fils enroulés autour d'une âme centrale en chanvre. Les caractéristiques principales de ces câbles sont indiquées dans les tableaux ci-après :

Câbles à torons de 42 *fils* (Bailly, Chaudouet, Desvoyod et Cie)

Diamètre des câbles en mm	Diamètre δ des fils en mm	Poids approximat. q par mètre courant en kgs	Résistances à la rupture correspondant à des résistances unitaires de :						
			70 kgs	90 kgs	120 kgs	140 kgs	160 kgs	180 kgs	200 kgs
4,5	0,5	0,074	545	696	945	1 090	1 260	1 392	1 575
5,4	0,6	0,106	785	1 008	1 350	1 570	1 800	2 016	2 250
6,3	0,7	0,145	1 065	1 370	1 839	2 130	2 452	2 740	3 065
7,2	0,8	0,189	1 390	1 790	2 406	2 780	3 208	3 580	4 010
8,1	0,9	0,239	1 760	2 270	3 030	3 520	4 040	4 540	5 050
9,0	1,0	0,295	2 180	2 800	3 750	4 360	5 000	5 600	6 250
9,9	1,1	0,357	2 640	3 400	4 530	5 280	6 040	6 800	7 550
10,8	1,2	0,425	3 140	4 050	5 415	6 280	7 220	8 100	9 025
11,7	1,3	0,498	3 680	4 750	6 345	7 360	8 460	9 500	10 575
12,6	1,4	0,578	4 260	5 500	7 350	8 520	9 800	11 000	12 250
13,5	1,5	0,664	4 900	6 300	8 430	9 800	11 240	12 600	14 050
14,4	1,6	0,755	5 570	7 180	9 630	11 160	12 840	14 360	16 050
16,2	1,8	0,955	7 050	9 100	12 210	14 100	16 280	18 200	20 350
18,0	2,0	1,180	8 700	11 200	15 000	17 400	20 000	22 400	25 000
19,8	2,2	1,430	10 500	13 500	18 210	21 000	24 280	27 000	30 350
21,6	2,4	1,695	12 500	16 100	21 660	25 000	28 880	32 200	36 100
24,3	2,7	2,150	15 700	20 450	27 450	31 400	36 600	40 900	45 750
27,0	3,0	2,650	19 550	25 200	33 750	39 100	45 000	50 400	—
30,6	3,4	3,400	25 100	32 400	43 500	50 200	58 000	—	—
35,1	3,9	4,480	33 100	42 700	57 000	66 200	—	—	—
39,6	4,4	5,720	42 000	54 300	72 600	84 000	—	—	—

Câbles à torons de 72 fils (Felten et Guilleaume)

Diamètres d des câbles en mm	Diamètres δ des fils en mm	Section F en cm²	Poids q par mètre courant en kgs
18	1,5	1,27	1,22
19	1,6	1,45	1,38
20	1,65	1,54	1,50
21	1,75	1,73	1,62
22	1,8	1,83	1,75
23	1,9	2,04	1,95
24	2,0	2,26	2,15
25	2,1	2,48	2,40
26	2,2	2,74	2,64

Dans les cas assez rares où le diamètre des poulies est petit par rapport à l'effort de traction, un câble de 42 fils serait trop rigide et aurait à supporter une trop grande fatigue à la flexion, aussi emploie-t-on alors un câble formé par 6 torons de 12 fils chacun.

Les câbles à torons sont assemblés par des épissures. Pour effectuer un tel assemblage on déroule d'abord les torons de chaque câble sur une longueur d'environ $1^m,50$, amenant ainsi les deux âmes en chanvre à jour. On coupe cette partie centrale des deux tronçons à une distance d'environ 15 centimètres du point de départ du déroulement et l'on fait toucher ces deux coupes. Le premier toron du tronçon gauche est alors enroulé sur toute sa longueur dans la place correspondante du premier toron du tronçon de droite, le troisième toron de gauche dans la place du troisième de droite sur une longueur de $0^m,90$, le cinquième sur une longueur de $0^m,45$ et ainsi de suite ; de même les deuxième, quatrième et sixième torons du tronçon de droite viennent dans les positions correspondantes du tronçon de gauche. Tous les torons sont ensuite coupés de façon à ne ressortir que de 15 centimètres et les fils enfoncés un à un dans le câble à l'aide d'un poinçon métallique. Lorsque le travail est effectué par un ouvrier exercé on n'aperçoit les épissures qu'en examinant attentivement le câble.

11. Câbles à torons aplatis et triangulaires. — Les câbles à torons

ordinaires n'offrent pas une surface bien lisse et ce sont toujours les mêmes fils extérieurs qui viennent en contact avec les poulies. Cet inconvénient a conduit les constructeurs à établir les câbles à torons aplatis représentés en vue extérieure et en coupe transversale par les figures 16 et 17 ; l'emploi de ces câbles ne s'est cependant pas généralisé et on ne les utilise comme tracteurs qu'exceptionnellement, dans les trans-

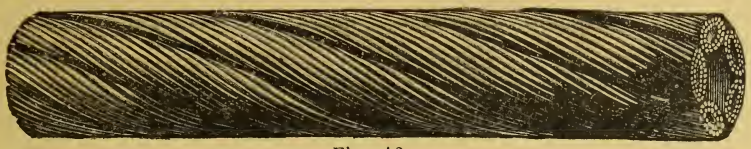


Fig. 16.

porteurs à grande inclinaison où la pression des pinces d'accouplement des wagonnets sur le câble est tellement considérable que l'on doit avoir une surface extérieure du câble aussi lisse que possible. Ils ont l'avantage d'être très flexibles, ce qui les a fait employer comme liaison entre les câbles porteurs et leurs contrepoids tendeurs, car ceux-ci étant constamment en mouvement, les câbles à surface rugueuse s'usent rapidement, détériorent les poulies-guide et n'offrent pas une sécurité suffisante.

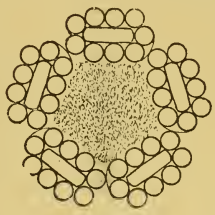


Fig. 17.

Le tableau suivant donne les caractéristiques principales de ces câbles d'après la maison Felten et Guilleaume. Les fils in-

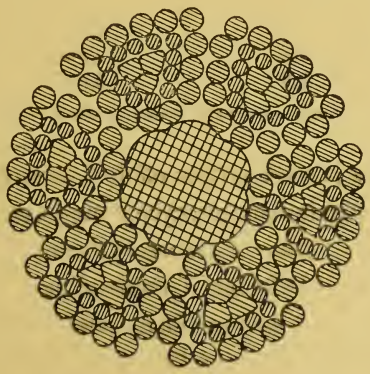


Fig. 18.

térieurs à section ovale des 5 torons ont une résistance à la rupture de 8 500 kilogrammes par centimètre carré, tandis que les fils ronds exté-

rieurs ont une résistance de 12000 kilogrammes ; dans les câbles à 45 fils la section des âmes ovales est les 25 à 26 centièmes de celle des fils ronds.

Diamètres des câbles d en mm	Diamètres des fils ronds δ en mm	Section F des fils ronds en cm²	Poids q en kgs par mètre courant
11	1,00	0,320	0,39
12	1,15	0,416	0,59
13	1,25	0,476	0,66
14	1,35	0,572	0,71
15	1,44	0,652	0,78
16	1,52	0,727	0,88
17	1,62	0,824	1,00
18	1,74	0,951	1,14
19	1,85	1,074	1,29
20	1,95	1,194	1,47
21	2,05	1,320	1,58
22	2,15	1,452	1,74
23	2,26	1,604	1,93
24	2,35	1,734	2,09
25	2,45	1,886	2,27
26	2,55	2,044	2,47
27	2,65	2,208	2,67
28	2,75	2,378	2,87
29	2,85	2,554	3,10
30	2,97	2,772	3,30
31	3,07	2,962	3,58
32	3,20	3,216	3,90
33	3,27	3,358	4,15
34	3,39	3,610	4,40
35	3,50	3,845	4,70

La figure 18 montre la section d'un câble à torons triangulaires dont la surface extérieure est également presque complètement lisse.

Le raccordement des câbles tendeurs à torons plats ou triangulaires avec les câbles porteurs, s'effectue à l'aide d'un manchon semblable à ceux décrits précédemment et d'une façon analogue au raccordement des câbles Simplex : après avoir enlevé l'âme en chanvre, on appuie les fils contre les parois du manchon au moyen de coins.

III. — Théorie et calcul d'un câble tendu.

12. Equilibre et résistance d'un câble. — Nous nous proposons de déterminer les forces qui interviennent par suite du poids propre, du vent et de la charge dans un câble tendu, ainsi que la forme que prend celui-ci sous l'action de ces différentes forces. La théorie exacte des câbles est très longue et les résultats que l'on obtient ne sont pas appropriés à l'usage courant ; pour cette raison, notre étude ne comprendra que ce qui est nécessaire pour obtenir des formules approchées pouvant être employées commodément dans la pratique.

Nous admettons le cas général c'est-à-dire le câble reposant sur deux appuis de hauteurs différentes. Si l'on ne tient pas compte des variations élastiques de forme qui restent toujours dans de très faibles limites et n'ont aucune influence sur le résultat final employé dans la pratique, on a pour le câble sous l'action de son seul poids propre, l'équation connue :

$$y = \frac{h}{2}\left(e^{\frac{x}{h}} + e^{-\frac{x}{h}}\right)$$

ou en utilisant les fonctions hyperboliques :

(2) $$y = h \cos \text{hyp}, \frac{x}{h}$$

et inversement

(2 *a*) $$\frac{x}{h} = \text{arc cos hyp.} \frac{y}{h};$$

dans cette égalité h est la distance du sommet de la chaînette à un axe horizontal (fig. 19).

Si on désigne par q le poids du mètre de câble, la tension en un point quelconque est :

(3) $$S = q \times y,$$

laquelle sera maximum au point d'appui supérieur du câble

(3 *a*) $$S_{max} = q \times y_1,$$

tandis qu'elle aura sa plus faible valeur au sommet de la courbe où elle sera horizontale, c'est-à-dire :

$$(3b) \qquad H = q \times h.$$

Désignons par :

F, la section du câble en centimètres carrés ;

K_z, le coefficient de rupture de la matière en kilogrammes par centimètre carré ;

Δ, le coefficient de sécurité dans le cas de la fatigue maximum admissible ;

γ, le poids spécifique des fils en kilogrammes par décimètre cube ;

ξ, coefficient d'enroulement donnant la longueur des fils développés en fonction de la longueur du câble.

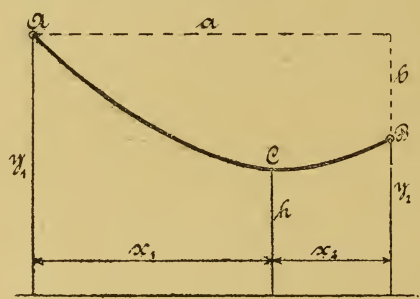


Fig. 19.

On a alors les relations suivantes :

$$S_{max} = \frac{FK_z}{\Delta}$$

et

$$10\, q = F\gamma\xi\,;$$

si on combine ces deux équations on obtient :

$$(4) \qquad S_{max} = q\,\frac{10K_z}{\Delta\xi\gamma}.$$

En égalant les deux derniers membres de (3 *a*) et de (4)

$$(5) \qquad y_1 = \frac{10K_z}{\Delta\xi\gamma} = \frac{R}{\Delta}\,;$$

telle est la longueur en mètres que doit avoir le câble pour obtenir une tension S_{max} dans sa section supérieure. R est la longueur de rupture en mètres qui caractérise la résistance d'un fil ou d'une bande de papier, par exemple.

Toutes les quantités qui entrent dans (5) sont données par la construction du câble et la nature de la matière, de sorte qu'en admettant un coefficient de sécurité constant, cette égalité peut être employée pour déterminer les courbes de tous les câbles de même construction et même qualité de matière ; on a alors :

$$S_{max} = q \frac{R}{\Delta}. \tag{6}$$

Le tableau suivant donne les différentes quantités nécessaires à la construction des câbles décrits dans le chapitre précédent :

Longueur de rupture et constante du câble

Mode de construction du câble	Charge de rupture K_z	Coefficient d'enroulement ξ	Longueur de rupture $R \backsim \frac{10 K_z}{\xi \gamma} m$	Constante du câble $C = \frac{R}{\Delta} m$
Câbles spiroïdaux . . .	6 000 12 000 14 500	1,073	7 120 14 230 17 200	1 420 2 850 3 440
Câbles clos avec une couche de fils à section en coins	5 700 9 500 12 000	1,110	6 540 10 900 13 780	1 310 2 180 2 760
Câbles clos avec âme ronde	5 700 9 500	1,08	6 720 11 200	1 340 2 240
Câbles de construction semi-close	9 500 12 000	1,14 (20 à 27 mm.) 1,10 (28 à 40 mm.)	10 610 et 10 990 13 400 et 13 900	2 120 et 2 200 2 680 et 2 780
Câbles à torons "Albert".	12 000		12 420 et 12 530	1 550 et 1 570
6 torons de 7 fils . . .	15 000	1,23	15 520 et 15 670	1 940 et 1 960
6 torons de 12 fils . . .	18 000	1,22	18 620 et 18 800	2 330 et 2 350

On a pris comme poids spécifique de l'acier $\gamma = 7^{kg},86$ par décimètre

cube. Le facteur d'enroulement élevé ξ pour les câbles à torons provient de ce que l'on n'a pas tenu compte dans q du poids de l'âme en chanvre ; l'erreur ainsi commise est sans influence sur le résultat.

Dans la plupart des installations actuelles on prend comme coefficient de sécurité des câbles porteurs 5 et pour les câbles tracteurs 8. Dans la dernière colonne les constantes $\frac{R}{\Delta}$ des câbles sont calculées avec ces coefficients.

y_1 étant donné par le tableau précédent, on a avec les désignations de la figure 19 :

(7) $$y_2 = y_1 - b.$$

La même figure donne :

$$x_1 + x_2 = a$$

et si dans cette égalité on introduit (2 a) on aura pour h :

(8) $$\frac{a}{h} = \text{arc cos hyp. } \frac{y_1}{h} + \text{arc cos hyp. } \frac{y_2}{h}.$$

Ceci obtenu, l'égalité (2 a) donne la distance horizontale de l'ordon-

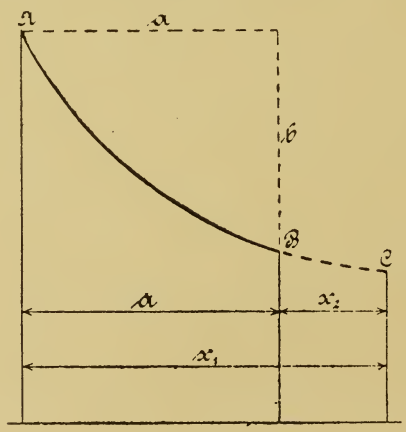


Fig. 20.

née du point le plus bas de la courbe au point d'appui et on peut tracer la courbe d'après l'égalité (2).

Lorsque le câble est très incliné (fig. 20) le sommet C correspondant à la hauteur h tombe en dehors de AB. On a alors

$$x_1 - x_2 = a$$

et

$$(8\,a) \qquad \frac{a}{h} = \text{arc cos hyp.}\ \frac{y_1}{h} - \text{arc cos hyp.}\ \frac{y_2}{h}.$$

L'égalité (8) ne donne aucune valeur de h et on doit employer (8 a). Ce procédé est trop compliqué pour la pratique, même à l'aide de tables graphiques [1].

13. Arc de parabole. — Dans les calculs pratiques on peut considérer que la longueur du câble diffère très peu de celle de la corde l reliant les deux points d'appui A et B, même lorsque la flèche est grande. Le poids total du câble est alors égal à environ $q \times l$, q étant le poids du

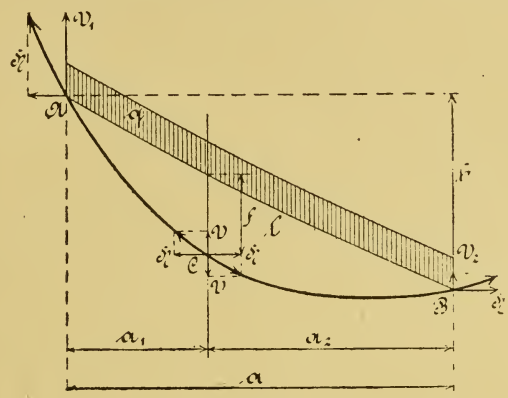


Fig. 21.

mètre. D'après cette hypothèse, pour l'équilibre du système (fig. 21), il résulte que la force horizontale H est la même aux deux points d'appui et par suite sur tout le câble.

De plus on a :

$$V_1 + V_2 = ql$$

et

$$V_1 . a = Hb + ql\,\frac{a}{2}.$$

De ces deux équations on tire les résultantes verticales des tensions du câble en A et B.

$$V_1 = \frac{ql}{2} + H\,\frac{b}{a}$$

$$V_2 = \frac{ql}{2} - H\,\frac{b}{a}.$$

---

[1] Babu. — *Annales des Mines*, 1895, pages 621 et suivantes.

Si l'on fait une coupe en C à une distance a_1 du point A, on a l'équation suivante des moments, par rapport au point C :

$$V_1 a_1 - H\left(b\frac{a_1}{a} + f\right) - ql\frac{a_1}{a}\cdot\frac{a_1}{2} = 0.$$

En remplaçant V_1 par sa valeur on obtient la flèche au point considéré :

$$f = \frac{ql}{2H}\left(a_1 - \frac{a_1^2}{a}\right)$$

ou sous une autre forme :

$$f = \frac{ql}{2H}\cdot\frac{a_1 a_2}{a}. \tag{9}$$

La flèche au milieu est par suite :

$$f_1 = \frac{1}{8}\frac{q}{H}\frac{l}{a}a^2. \tag{9a}$$

Cette équation montre que la courbe du câble est une parabole qui peut être facilement tracée par la méthode connue des tangentes, ayant les deux points A, B, le sommet, et H étant donné.

Par le milieu C de AB on mène vers le bas la verticale CD égale à

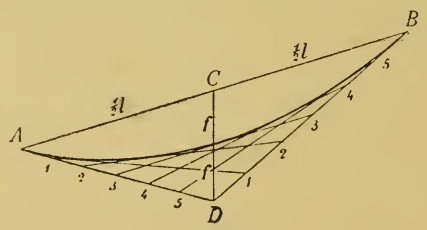


Fig. 22.

$2f_1$ et l'on tire AD, BD (fig. 22). On divise ensuite chacune de ces deux lignes en un même nombre de parties égales et l'on joint les points de division ayant la même désignation, celle-ci étant faite comme l'indique la figure ci-dessus. Les droites ainsi tracées enveloppent la parabole cherchée et les lignes AD et BD lui sont tangentes aux extrémités A et B.

On s'impose presque toujours une certaine tension égale à la force de rupture du câble divisée par un coefficient de sécurité et on ne doit pas la dépasser au point d'appui supérieur A (fig. 21). Si l'on revient aux ef-

forts de la chaînette (fig. 19 et 20) que l'on avait remplacée par une parabole, on obtient avec l'équation (3) la tension au point d'appui A

$$S = H + qb.$$

Cette égalité est d'autant plus inexacte que la distance verticale du sommet C de la chaînette à l'horizontale menée par A se rapproche de la distance b qui sépare le point d'appui inférieur de la même horizontale. On commet ainsi une erreur très petite, comme le prouve la démonstration suivante.

Dans (9 a) remplaçons H par sa valeur tirée de l'égalité ci-dessus, on a :

$$f_1 = \frac{1}{8} \frac{q}{S - qb} \cdot \frac{l}{a} \cdot a^2$$

ou en employant l'équation (6) :

$$(10) \qquad f_1 = \frac{1}{8} \frac{a^2}{\frac{R}{\Delta} - b} \cdot \frac{l}{a}.$$

Cette valeur de f_1 permet de tracer la parabole en employant le mode de construction indiqué par la figure 22.

Plus la longueur de la section, c'est-à-dire la distance entre les appuis est petite et plus la courbe se rapproche de la chaînette. En supposant que les hauteurs des points d'appui A et B restent à peu près les mêmes, on peut négliger b, dont la valeur devient petite vis à vis de celle de $\frac{R}{\Delta}$, de même le rapport $\frac{l}{a}$ est alors égal à 1 et on obtient l'égalité simplifiée suivante donnant la valeur de la flèche au milieu de la courbe :

$$(10\ a) \qquad f_1 = \frac{1}{8} \frac{a^2}{\frac{R}{\Delta}}.$$

Dans le cas d'une grande portée et lorsque les deux points d'appui sont sur une même horizontale AB (fig. 19) on obtient une valeur plus exacte de la flèche f_1 en remplaçant dans (10) b par sa valeur tirée de (10 a).

Pour nous rendre compte de l'erreur que l'on commet en remplaçant la chaînette par la parabole nous allons calculer ces deux courbes en

admettant que C = 1 900 pour une portée a = 1 000 mètres et pour certaines valeurs de la différence de hauteur b. La flèche f_k de la chaînette est donnée par l'égalité :

$$f_k = C - y_m - \frac{1}{2} b \tag{11}$$

en se rapportant à la figure 23.

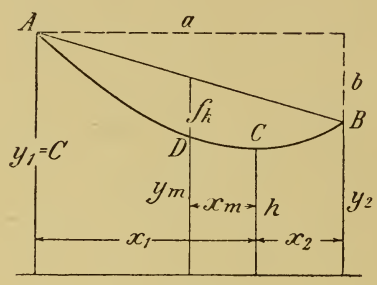


Fig. 23.

Tableau comparatif de la chaînette et de la parabole pour une portée a = 1 000 mètres

Différence de hauteurs b en mètres entre les points A et B	0	100	200	300	400	500	600	700
Ordonnée du point B = C − y_2 en mètres	1 900	1 800	1 700	1 600	1 500	1 400	1 300	1 200
Paramètre de la chaînette = h en mètres	1 831,5	1 769,5	1 691	1 593	1 498	1 391	1 282	1 174
Distance du sommet C au point A = x_1 en mètres	500	670	830	980	1 074	1 156	1 214	1 246
Distance du sommet C au point B = x_2 en mètres	500	330	170	20	74	156	214	246
Flèche au milieu de la chaînette = f_k en mètres . . .	68,5	71	76	82	91	99	114	130
Flèche au milieu de la parabole = f_p en mètres . . .	69,5	69,8	75,1	81,7	89,8	99,8	112,3	127
Erreur commise pour 100 . .	+1,4	−1,7	−1,2	−0,4	−1,3	+0,8	−1,9	−2,4

Les valeurs de f_k que l'on obtient ainsi sont données dans le tableau ci-contre. Comme on le voit, dans le cas de pentes très raides le sommet de la chaînette se trouve presque à la même hauteur que le point d'appui inférieur.

Pour tous les cas qui se présentent dans la pratique l'égalité (10) donne une valeur de la flèche suffisamment exacte sans qu'il soit nécessaire d'effectuer la formule compliquée de la chaînette, tandis que l'égalité (10 *a*) très souvent employée, donne un résultat trop faible dans le cas de grandes différences de hauteurs des points d'appui.

Pour déterminer la flèche f d'un tronçon AB dont l'extrémité supérieure A se trouve à une hauteur b_0 au-dessous du point d'appui A_0.

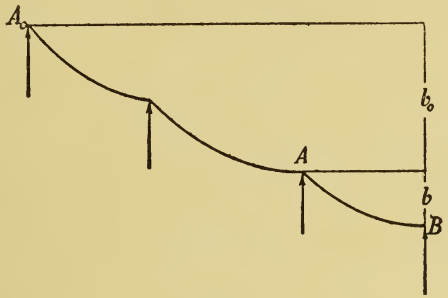


Fig. 24.

on doit retrancher de la constante du câble la longueur $b + b_0$ (fig. 24).

14. Influence du vent. — Dans les installations modernes, on ne tient généralement pas compte de l'action du vent sur les câbles tendus. Si l'on considère le cas le plus défavorable, c'est-à-dire lorsque le vent souffle perpendiculairement au câble, on a sur un mètre de longueur une pression en kilogrammes de :

$$q_v = \frac{2}{3} pd$$

dans laquelle égalité d est le diamètre du câble en mètres et p la pression du vent en kilogramètres sur 1 mètre carré de surface, donnée approximativement en fonction de la vitesse du vent v par l'égalité

$$p = 0{,}122\, v^2.$$

En remplaçant dans la première égalité p par sa valeur, on a :

$$(12) \qquad q_v = \text{environ } \frac{1}{1\,250} v^2 d \text{ en kgm.}$$

v étant exprimé en mètres par seconde et d en centimètres.

La flèche latérale du câble représentée par la figure 25 peut être calculée en remplaçant q_v par sa valeur dans l'égalité (9 a). On a ainsi pour le câble des wagonnets vides le rapport $\frac{f_v}{f_1} = \frac{q_v}{q}$, de telle sorte que l'angle d'oscillation α que fait le plan du câble avec la verticale est donné par l'égalité :

$$\text{tg } \alpha = \frac{q_v}{q}.$$

D'où l'on voit que cet angle est d'autant plus petit que le poids q du câble est plus grand ; le câble porteur des wagonnets vides oscille par conséquent davantage que le gros câble.

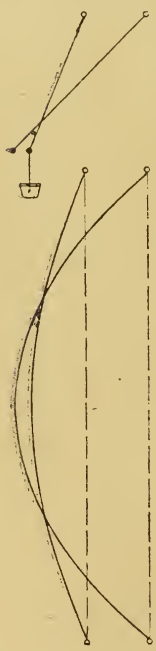


Fig. 25.

Plusieurs chemins aériens présentant une grande portée, construits sur les côtes de la Nouvelle-Calédonie, doivent supporter régulièrement pendant plusieurs heures par jour l'action du vent de mer qui souffle perpendiculairement à la ligne. Le petit câble est poussé de ce fait sur le gros et vient s'enchevêtrer dans les wagonnets pleins, occasionnant ainsi journellement une assez longue immobilisation de l'installation (fig. 25). Si l'on avait pris pour les wagonnets pleins un câble de construction close ayant une constante C d'environ 2 200 et pour les wagonnets vides un câble à fils ronds, ayant une résistance à la rupture plus grande avec C = 2 850 la flèche du petit câble n'aurait été que les $\frac{2\,200}{2\,850} = 0{,}77$ de celle du gros, de cette façon le câble des wagonnets vides serait resté au-dessus de celui des wagonnets pleins et l'on aurait ainsi évité la position représenté par la figure 25. En admettant que la vitesse maximum du vent pendant le fonctionnement de l'installation soit $v = 0{,}25$ mètres à

à la seconde, l'égalité (12) nous donne pour un câble clos de 32 millimètres de diamètre :

$$q_v = 1{,}6 \text{ kgm.}$$

le poids du mètre étant $5^{kg},4$, on a :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1{,}6}{5{,}4} = \text{environ } 0{,}3,$$

et pour le câble en fils ronds des wagonnets vides, de 25 millimètres de diamètre :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1{,}25}{3{,}13} = 0{,}4.$$

Lorsque les câbles ont une flèche importante dans une grande portée, les infléchissements représentés par la figure 25 se présentent souvent, si l'on n'a pas prévu le câble des wagonnets vides avec une grande résistance. Dans les installations du chapitre 60 n'ayant qu'un wagonnet sur chaque voie, le câble tracteur est relativement peu tendu et par suite poussé très loin par le vent ; aussi un enchevêtrement est-il à craindre. La plupart du temps la flèche du câble tracteur est tellement grande que le wagonnet opposé passe facilement au-dessus.

15. Influence des wagonnets. — Dans les grandes installations le câble n'est fixé qu'à l'une de ses extrémités ; la flèche qui est déterminée uniquement par le poids propre, telle que nous venons de l'étudier est encore augmentée par le poids des wagonnets suspendus. Supposons le poids du câble nul et sur toute la portée une seule charge P (fig. 26), le câble est en équilibre sous l'action des trois forces : P, S_1, S_2 et l'on a par suite :

(13 *a*) $$S_1 \sin(\alpha + \gamma) + S_2 \sin(\beta - \gamma) = P$$

(13 *b*) $$S_1 \cos(\alpha + \gamma) = S_2 \cos(\beta - \gamma)$$

$$P a_1 = S_2 \frac{a}{\cos \gamma} \sin \beta$$

et

(14) $$P a_2 = S_1 \frac{a}{\cos \gamma} \sin \alpha.$$

On a de plus les relations géométriques suivantes :

(15) $$\operatorname{tg} \gamma = \frac{b}{a}$$

(16) $$f' = a_1 \frac{\sin \alpha}{\cos \gamma \cos (\alpha + \gamma)}.$$

En combinant les deux égalités (14),(16) et en tenant compte de (13 *b*) on obtient :

$$f' = \frac{P}{S_1 \cos (\alpha + \gamma)} \cdot \frac{a_1 a_2}{a} = \frac{P}{S_2 \cos (\beta - \gamma)} \cdot \frac{a_1 a_2}{a}$$

ou

(17) $$f' = \frac{P}{H} \cdot \frac{a_1 a_2}{a}$$

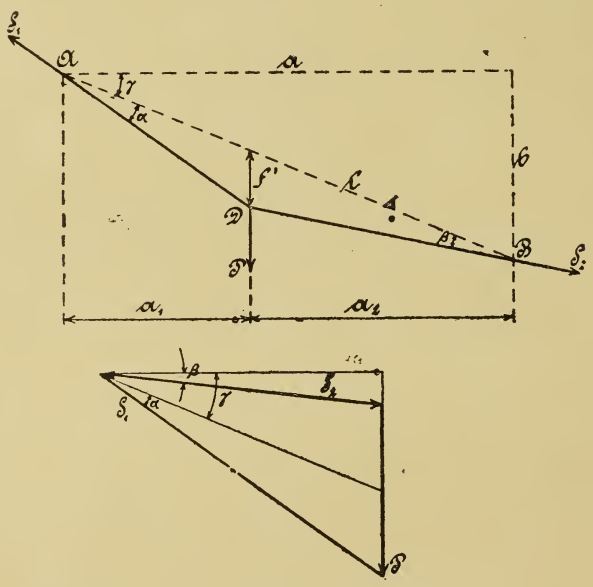


Fig. 26.

dans laquelle H est la projection horizontale constante de la tension du câble en un point quelconque et égale à

$$S_{max} - qb.$$

La forme de l'égalité (17) est semblable à celle de (9) et l'on voit que

la charge P, en se déplaçant sur un câble supposé sans poids, décrit une parabole dont la flèche au milieu est :

$$f_2 = \frac{1}{4}\frac{P}{q}\frac{a}{\frac{R}{\Delta} - b}. \tag{17 a}$$

Dans ce cas on doit opérer comme pour la figure 24, c'est-à-dire qu'il faut retrancher de C la distance verticale qui sépare l'extrémité supérieure du tronçon du point de fixation le plus élevé du câble tout entier.

L'égalité (10) nous donne entre f_1 et f_2 la relation simple suivante :

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{2P}{ql}.$$

Lorsqu'on a sur un câble plusieurs charges séparées : P_1, P_2, P_3 à une distance l'une de l'autre d'environ c (fig. 27), la flèche maximum a lieu

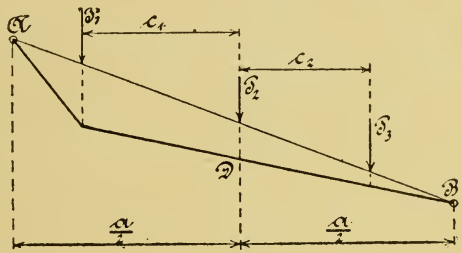


Fig. 27.

quand l'une des charges, P_2 par exemple, se trouve au milieu D. La charge P_1 abaisse le sommet de la quantité

$$f_m = \frac{P_1}{H} \cdot \frac{\left(\frac{1}{2}a + c_1\right)\left(\frac{1}{2}a - c_1\right)}{a} \cdot \frac{\frac{1}{2}a}{\frac{1}{2}a + c_1}$$

ou

$$f_m = \frac{1}{4}\frac{P_1}{q(c-b)} \cdot \frac{\frac{1}{2}a - c_1}{\frac{1}{2}a} \cdot a.$$

Si les deux points A et D étaient réunis par une poutre rigide, P_1 déterminerait sur D une charge égale à

$$P_1 \cdot \frac{\frac{1}{2}a - c_1}{\frac{1}{2}a}.$$

L'égalité donnant la valeur de f_m a une forme analogue à (17 *a*) ; le même raisonnement nous conduirait à un résultat semblable pour la charge P_3. On en déduit alors que la parabole déterminée par les charges roulantes peut être construite en prenant comme flèche la valeur donnée par l'égalité (17 *a*), la force au milieu représentant toutes les charges réduites en ce point.

Si l'on a sur le tronçon de câble n wagonnets de poids unitaire P_1 à une distance c les uns des autres, il s'en suit :

$$P = P_1 + 2P_1 \frac{\frac{1}{2}a - c}{\frac{1}{2}a} + 2P_1 \frac{\frac{1}{2}a - 2c}{\frac{1}{2}a} + \ldots + 2P_1 \frac{\frac{1}{2}a - \frac{1}{2}(n-1)c}{\frac{1}{2}a}$$

ou

$$P = P_1 + 2P_1\left(1 - \frac{2c}{a}\right) + 2P_1\left(1 - \frac{4c}{a}\right) + \ldots 2P_1\left(1 - \frac{(n-1)c}{a}\right)$$
$$= nP_1 - 4P_1\frac{c}{a}\left(1 + 2 + 3 + \ldots + \frac{n-1}{2}\right).$$

La somme entre parenthèses est égale à :

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{n-1}{2}\left(\frac{n-1}{2} + 1\right) = \frac{1}{8}(n^2 - 1).$$

D'où

$$P = P_1\left[n - \frac{c}{2a}(n^2 - 1)\right]. \tag{18}$$

16. Longueur du câble. — La longueur d'un câble tendu entre deux pylônes est donnée par la formule approchée suivante :

$$L = l\left[1 + \frac{2}{3}\left(\frac{2f_0}{l}\right)^2\right]$$

dans laquelle f_0 est la flèche perpendiculaire à la corde AB. Si f est la flèche verticale de la courbe (fig. 28)

$$f_0 = f\frac{a}{l}$$

et

$$\text{(19)} \qquad L = l + \frac{8}{3}\frac{f^2}{l}\left(\frac{a}{l}\right)^2.$$

Lorsque l'on calcule la longueur du câble non chargé, on remplace

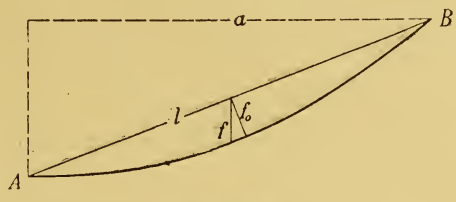


Fig. 28.

dans l'égalité précédente la flèche f_1 par sa valeur tirée de l'équation (10) et l'on a :

$$L = l + \frac{1}{24l}\left(\frac{a^2}{\frac{R}{\Delta} - \Sigma\, b}\right)^2$$

et avec

$$l = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$\frac{1}{l} = \frac{1}{a\left(1 + \frac{b^2}{a^2}\right)^{\frac{1}{2}}} \sim \frac{1}{a}\left(1 - \frac{1}{2}\frac{b^2}{a^2}\right)^{(1)}$$

$$L = \sqrt{a^2 + b^2} + \left(\frac{1}{\frac{R}{\Delta} - \Sigma\, b}\right)^2 \frac{a^3}{24}\left(1 - \frac{1}{2}\frac{b^2}{a^2}\right)$$

ou finalement

$$\text{(20)} \qquad L = \sqrt{a^2 + b^2} + \frac{a}{24}\left(\frac{1}{\frac{R}{\Delta} - \Sigma\, b}\right)^2 . \left(a^2 - \frac{1}{2}b^2\right).$$

---

(1) $\sim$: égale environ.

Nos des pylônes	Abscisses x	Ordonnées y	Portées a	Différence de niveau b	Σb	$\frac{R}{\Delta} - \Sigma b$	$A = \left(\frac{R}{\Delta} - \Sigma b\right)^2$	a^2	b^2	$l^2 = a^2 + b^2$	$B = a^2 - \frac{1}{2} b^2$	$\sqrt{l^2}$	$C = \frac{a.B}{24\,A}$	$L = \sqrt{l^2} + C$
Station	19,25	342,58	76,13	3,85	64	2716	737 × 10⁴	5791,2 + 4,6	14,8	5851,6	5830	76,50	0,00	76,50
1. . .	95,38	346,43	292,54	2,73	61 ↑	2719	739 × 10⁴	85264,0 + 315,9	7,5	85587,4	85600	292,55	0,14	292,69
2. . .	387,92	349,16	210,22	9,76	51	2729	744 × 10⁴	44100,0 + 92,5	95,3	44287,4	44100	210,45	0.05	210,50
3. . .	598,14	358,92	162,29	24,81	27	2753	758 × 10⁴	26244,0 + 94,0	615,5	26953,5	26000	164,18	0,02	164,70
4. . .	760,43	383,73	30,21	8,94	18	2762	—	912,0 + 0,6	79,9	922,5	—	31,50	—	31,50
5. . .	790,62	392,67	59,62	10,84	7	2773	—	3552,2 + 2,4	117,5	3672,1	—	60,60	—	60,60
6. . .	840,24	403,51	131,65	6,72	0	2780	775 × 10⁴	17161,0 + 170,7	45,2	17376,9	17320	131,81	0,01	131,82
7. . .	971,89	411,23	14,64	9,88	0	2780	—	213,2 + 1,2	97,6	312,0	—	17,66	—	17,66
8. . .	986,53	391,35	15,08	9,88	10	2770	—	249,6 + 2,4	97,6	325,0	—	18,03	—	18,03
9. . .	1001,61	381,47	15,88	10,89	20	2760	—	225,0 + 2,5	118,6	370,7	—	19,26	—	19,26
10. . .	1016,47	370,58	15,03	10,27	31	2749	—	225,0 + 0,9	105,5	331,4	—	18,20	—	18,20
11. . .	1031,50	260,31	350,86	25,04	41	2739	750 × 10⁴	122500,0 + 602,7	625,2	123727,9	122800	351,74	0,02	351,76
12. . .	1382,36	235,27	233,13	95,39	66	2714	736 × 10⁴	54289,0 + 60,6	909,3	5525,89	53900	235,01	0,07	235,08
13. . .	1615,49	139,88	288,72	12,16	161	2710	685 × 10⁴	82944,0 + 415,2	147,9	83[illegible]07,1	83290	289,00	0,15	289,15
14. . .	1904,21	127,72	38,53	2,18	174 ↓	2606	—	1482,3 + 2,3	4,8	1489,4	—	38,59	—	38,59
15. . .	1942,74	125,54	35,91	7,33	174	2604	—	1288,8 + 0,7	53,7	1343,2	—	36,65	—	36,65
Tendeur	1978,65	118,21										1991,73		1992,20

Câble de construction demi-close . . . . . $K_z = 12\,000$ kg par cm²

Coefficient de sécurité . . . . . $\Delta = 5$

Constante du câble . . . . . $\frac{R}{\Delta} = 2\,780$ m.

Lorsqu'on a établi ses calculs comme ils sont représentés dans le tableau précédent, on obtient rapidement et d'une façon suffisament exacte la valeur L à l'aide d'une table des carrés et d'une règle à calcul. La longueur du câble ne doit être calculée d'après l'égalité (20) que lorsque la portée dépasse 100 mètres, au-dessous de cette valeur la longueur exacte ne diffère que de quelques millimètres de la droite qui joint les deux points d'appui.

Les calculs effectués montrent plus clairement que toute démonstration théorique que la parabole approchée donne une approximation plus suffisante qu'il n'est nécessaire dans la pratique. Dans l'exemple précédent, si on avait négligé les flèches du câble, celui-ci aurait été trop court de $0^m,47$ soit 0,024 %, approximation plus grande que celle que l'on peut donner avec la levée de plan la plus soignée; cette erreur est d'ailleurs largement compensée par l'allongement du câble. Dans les chemins aériens ne présentant pas de très grandes portées, on peut prendre comme longueur du câble la somme des distances entre les pylônes, et ne pas tenir compte des colonnes du tableau imprimées en caractères plus fins.

17. Effort de tension du câble tracteur. — Nous avons désigné par

L, la longueur en mètres du chemin aérien mesurée obliquement;

Q, le débit de l'installation en tonnes;

γ, la pente moyenne;

l, la projection horizontale de la voie en mètres;

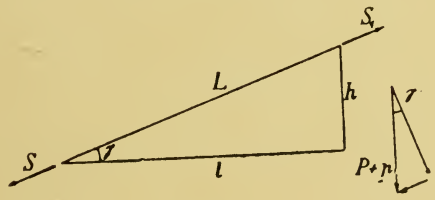


Fig. 29.

h, la différence de hauteur des stations terminales;

p, le poids d'un wagonnet vide en kilogrammes;

P, le poids de la charge utile d'un wagonnet;

n, le nombre de wagonnets sur une voie du chemin aérien.

Le transport s'effectue de bas en haut et la tension à la partie inférieure du câble tracteur du côté des wagonnets pleins est égale à S. Cette tension est augmentée à la partie supérieure de la projection sur la verticale h du poids propre de câble $qh = q\mathrm{L} \sin \gamma$, du poids direct des wagonnets $n\,(p + \mathrm{P}) \sin \gamma$, de la résistance au frottement des n wagonnets $n(p + \mathrm{P})$ et du câble lui-même $q\mathrm{L}$ soit $[n\,(p + \mathrm{P}) + q\mathrm{L}] \times \cos \gamma \mu$ (fig. 29). On a alors comme tension maximum,

$$\mathrm{S}_1 = \mathrm{S} + \left[q\mathrm{L} + n\,(p + \mathrm{P})\right] (\sin \gamma + \mu \cos \gamma).$$

Si l'on désigne par S′ et S'_1 les tensions correspondantes du câble tracteur du côté de la voie des wagonnets vides on a :

$$\mathrm{S}'_1 = \mathrm{S}' + [q\mathrm{L} + np] (\sin \gamma - \mu \cos \gamma),$$

car le poids des wagonnets et du câble agit absolument de la même façon tandis que les frottements deviennent négatifs.

Lorsque le transport s'effectue de haut en bas on a :

$$\mathrm{S}_1 = \mathrm{S} + [q\mathrm{L} + n\,(p + \mathrm{P})] (\sin \gamma - \mu \cos \gamma)$$

et

$$\mathrm{S}'_1 = \mathrm{S}_1 + [q\mathrm{L} + np] (\sin \gamma + \mu \cos \gamma).$$

Avec les relations

$$\cos \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 + \mathrm{tg}^2 \alpha}} = \left(1 + \frac{h^2}{l^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \sim 1 - \frac{1}{2}\frac{h^2}{l^2}$$

$$\sin \gamma = \frac{\mathrm{tg}\,\alpha}{\sqrt{1 + \mathrm{tg}^2 \alpha}} \sim \frac{h}{l}\left(1 - \frac{1}{2}\frac{h^2}{l^2}\right)$$

le dernier membre des équations disparaît dans

$$\sin \gamma \pm \mu \cos \gamma = \left(1 - \frac{1}{2}\frac{h^2}{l^2}\right)\left(\frac{h}{l} \pm \mu\right).$$

L'égalité $n\mathrm{P}v = \frac{\mathrm{Q}}{3.6}\mathrm{L}$ donne :

$$n = \frac{\mathrm{QL}}{3{,}6\mathrm{P}v}, \tag{21}$$

de sorte que le premier facteur peut se transformer de la façon suivante :

$$qL + n(p + P) = qL + \frac{QL}{3.6\,Pv}(p + P)$$

$$= QL\left[\frac{q}{Q} + \frac{0,278}{v}\left(1 + \frac{p}{P}\right)\right].$$

Dans cette égalité on peut encore remplacer L par sa valeur

$$\sqrt{l^2 + h^2} = l\left(1 + \frac{h^2}{l^2}\right)^{\frac{1}{2}} \sim l\left(1 + \frac{1}{2}\frac{h^2}{l^2}\right).$$

On a alors comme différence de tensions du câble tracteur du côté des wagonnets pleins :

$$S_1 - S = Ql\left[\frac{q}{Q} + \frac{0,278}{v}\left(1 + \frac{p}{P}\right)\right]\left(\frac{h}{l} \pm \mu\right), \tag{22}$$

si l'on considère que

$$\left(1 + \frac{1}{2}\frac{h^2}{l^2}\right) \cdot \left(1 - \frac{1}{2}\frac{h^2}{l^2}\right)$$

est égale à environ 1.

Lorsque le transport s'effectue de bas en haut, on prend le signe positif et au contraire lorsqu'il se fait de haut en bas on prend le signe négatif. Pour le coté des wagonnets vides on fait naturellement le même changement de signe, de plus la somme des charges entre parenthèses disparaît.

Si l'on considère que d'un coté on doit transporter par heure la quantité $Q_1 t$ en wagonnets d'une contenance de P_1 kilogrammes et d'un poids propre de p_1 kilogrammes, tandis que de l'autre côté on a $Q_2 t$ par heure en wagonnets d'une contenance de P_2 kilogrammes et d'un poids propre de p_2 kilogrammes, l'équation générale modifiée donne :
sur la première voie la charge totale :

$$G_1 = qL + n_1(p_1 + P_1) + n_2 p_2$$

et sur la deuxième

$$G_2 = qL + n_2(p_2 + P_2) + n_1 p_1.$$

Les deux valeurs de n sont de nouveau données par l'équation (21), de telle sorte que l'on a finalement :

$$(23)\quad \begin{cases} S_1 = S + Q_1 l \left[\dfrac{q}{Q_1} + \dfrac{0{,}278}{v}\left(1 + \dfrac{p_1}{P_1} + \dfrac{Q_2}{Q_1}\cdot\dfrac{p_2}{P_2}\right)\right]\left(\dfrac{h}{l} \pm \mu\right) \\ \text{et} \\ S'_1 = S' + Q_2 l \left[\dfrac{q}{Q_2} + \dfrac{0{,}278}{v}\left(1 + \dfrac{p_2}{P_2} + \dfrac{Q_1}{Q_2}\cdot\dfrac{p_1}{P_1}\right)\right]\left(\dfrac{h}{l} \mp \mu\right). \end{cases}$$

Si l'on transporte au retour une quantité Q_2 avec quelques-uns des wagonnets vides $p_1 = p_2$, le troisième membre entre crochets de la première des équations (23) disparaît et la deuxième équation reste invariable.

La tension maximum a lieu au point le plus élevé du chemin aérien, à moins que le profil ne présente aussitôt après ce point une longue pente douce descendante sur laquelle le frottement μ serait plus grand que la force déterminée par $\frac{h}{l}$, inclinaison moyenne de cette partie. L'équation donne directement la différence de tension aux deux stations terminales quels que soient le nombre de pentes et leur sens y entre en

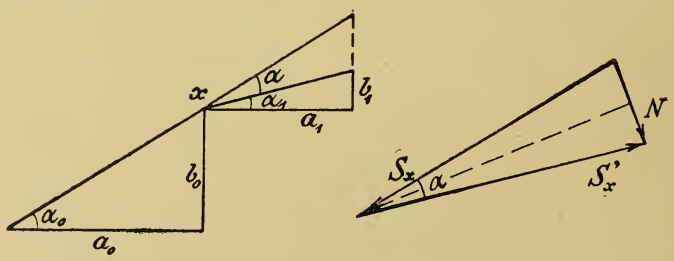


Fig. 30.

ligne de compte. L'augmentation d'inclinaison déterminée par la flexion du câble porteur ; toutefois il n'en est pas de même du frottement des rouleaux porteurs placés à chaque pylône des bicâbles et sur lesquels vient reposer le câble tracteur lorsque les wagonnets sont à une grande distance les uns des autres. Quand le profil est à peu près régulier, la pression sur les rouleaux est tellement petite que l'on peut à la rigueur né-

gliger l'augmentation de tension qu'elle détermine. Lorsque la ligne passe au-dessus d'une surélévation de terrain le frottement des rouleaux devient très important ; au point culminant x le câble, dont la tension est égale à S, appuie sur les galets avec une force égale à $2\,S \sin \frac{\alpha}{2}$ (fig. 30).

Dans ce cas on calculera une fois pour toutes, les valeurs A_1 et A_2 constantes pour une même installation.

$$A_1 = Q_1\left[\frac{q}{Q_1} + \frac{0{,}278}{v}\left(1 + \frac{p_1}{P_1} + \frac{Q_2}{Q_1}\cdot\frac{p_2}{P_2}\right)\right]. \tag{24}$$

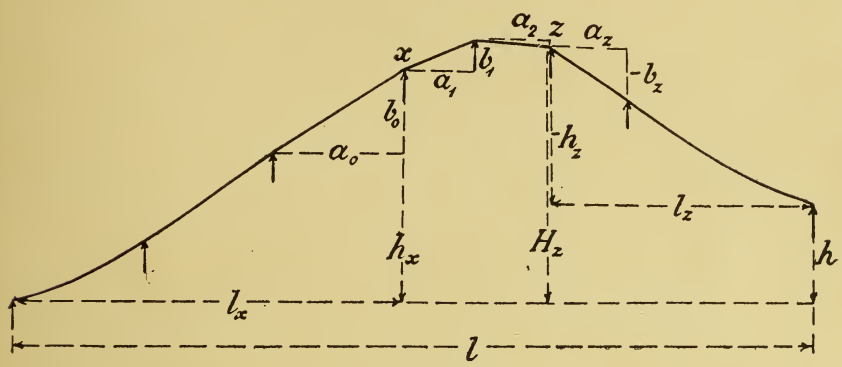


Fig. 31.

On a alors la tension au point x (fig. 31) :

$$S_x = S + A_1(h_x \pm \mu l_x),$$

laquelle est augmentée de la quantité $\mu_r N$ lorsque le transport s'effectue en montant et diminuée de la même quantité quand la charge descend, μ_r étant le frottement des rouleaux porteurs.

A tous ces efforts on doit encore ajouter la résistance déterminée par la rigidité du câble, lequel prend au passage des galets une courbure dont le rayon est plus grand que celui des rouleaux mêmes (fig. 32). Les moments de rotation des efforts de tension du câble devant et derrière le rouleau sont alors :

$$M_v = S_v(r + \xi)$$
$$M_h = S_h(r - \xi).$$

Si nous admettons que le tout est en équilibre, nous pourrons écrire que les deux moments sont égaux, ce qui donne :

$$S_h = S_v \frac{1 + \frac{\xi}{r}}{1 - \frac{\xi}{r}} \sim S_v\left(1 + \frac{\xi}{r}\right)^2 \sim S_v\left(1 + \frac{2\xi}{r}\right)$$

ou

$$S_h = S_v\left(1 + \frac{4\xi}{D}\right),$$

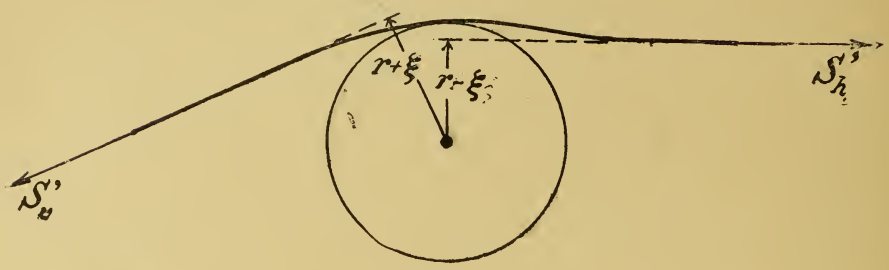


Fig. 32.

dans laquelle égalité, D est le diamètre du rouleau et ξ le coefficient de rigidité du câble.

En remplaçant N par sa valeur nous obtiendrons comme tension dans le câble après le $x^{\text{ième}}$ rouleau porteur :

$$S_x = \left[S + A_1(h_x \pm \mu l_x)\right]\left(1 \pm 2\mu_r \sin\frac{\alpha}{2} \pm \frac{4\xi}{D}\right).$$

Cette tension augmente jusqu'au galet suivant de la quantité

$$A_1(b_1 \pm \mu a_1)$$

donnée par les équations (22) et (23).

Derrière le $x + 1^{\text{ième}}$ rouleau on a :

$$S_{x+1} = \left[S_x' + A_1(b_1 \pm \mu a_1)\right]\left(1 \pm 2\mu_r \sin\frac{\beta}{2} \pm \frac{4\xi}{D}\right),$$

β étant l'angle d'inflexion du câble au point considéré.

Comme l'inflexion sur un rouleau est peu importante (fig. 30), on peut admettre que :

$$2\sin\frac{\alpha}{2} \sim \alpha$$

$$\alpha = \alpha_0 - \alpha_1 \sim \frac{b_0}{a_0} - \frac{b_1}{a_1}.$$

L'erreur faite ainsi est très peu importante et ne dépasse pas 3 %, même dans les cas sortant de l'ordinaire.

La substitution précédente donne alors :

$$S'_x = [S + A_1(h_x \pm \mu l_x)] \left[1 \pm \mu_r\left(\frac{b_0}{a_0} - \frac{b_1}{a_1}\right) \pm \frac{4\xi}{D}\right],$$

en effectuant entre parenthèses et en négligeant les produits dans lesquels entrent en facteurs les quantités infiniment petites $\mu_x \mu_r$ et $\frac{\mu\xi}{D}$ on a :

$$S'_x = S\left[1 \pm \mu_r\left(\frac{b_0}{a_0} - \frac{b_1}{a_1}\right) \pm \frac{4\xi}{D}\right] + A_1\left[h_x \pm \mu l_x \pm \mu_r h_x\left(\frac{b_0}{a_0} - \frac{b_1}{a_1}\right) \pm \frac{4\xi h_x}{D}\right].$$

On obtient d'une façon analogue :

$$S'_{x+1} = S\left[1 \pm \mu_r\left(\frac{b_0}{a_0} - \frac{b^2}{a^2}\right) \pm \frac{8\xi}{D}\right] + A_1\left[h_x + b_1 \pm \mu(l_x + a_1)\right.$$
$$\left. \pm \mu_r h_x\left(\frac{b_0}{a_0} - \frac{b_2}{a_2}\right) \pm \mu_r b_1\left(\frac{b_1}{a_1} - \frac{b_2}{a_2}\right)\right]$$

et finalement on a la tension derrière un rouleau quelconque z :

$$S'_z = S\left[1 \pm \mu_r\left(\frac{b_0}{a_0} - \frac{b_z}{a_z}\right) \pm \frac{4\xi}{D} \cdot z\right] + A_1\left[h_x + b_1 + b_2 + \ldots + b_{z-1}\right.$$
$$\pm \mu(l_x + a_1 + a_2 + \ldots + a_{z-1}) \pm \mu_r\left[h_x\left(\frac{b_0}{a_0} - \frac{b_z}{a_z}\right) + b_1\left(\frac{b_1}{a_1} - \frac{b_z}{a_z}\right) + \ldots\right.$$
$$\left.\left. + b_{z-1}\left(\frac{b_{z-1}}{a_{z-1}} - \frac{b_z}{a_z}\right) \pm \frac{4\xi}{D}(h_x + b_1 + b_2 + \ldots + b_{z-1})\right]\right].$$

Si l'on désigne par z le dernier rouleau fortement chargé de la surélévation du profil (fig. 31), la tension finale est :

$$S_1 = S'_z + A_1(h_z \pm \mu l_z)$$

ou

$$(25) \quad S_1 = S\left[1 \pm \mu_r\left(\frac{b_0}{a_0} - \frac{b_z}{a_z}\right) \pm \frac{4\xi}{D} \cdot z\right] + A_1\left[h \pm \mu l \pm \frac{4\xi}{D} \cdot H_z\right.$$
$$\left. \pm \mu_r\left[\frac{b_z}{a_z} \cdot H_z - \frac{b_0}{a_0} \cdot h_x - \left(\frac{b_2^1}{a_1} + \frac{b_2^2}{a_2} + \ldots + \frac{b_{z-1}^2}{a_{z-1}}\right)\right]\right].$$

Cette équation permet de déterminer les tensions en un point quelconque du câble si l'on a calculé jusque là les valeurs de h et de l ainsi que celles de b et de a dans les membres où ils sont multipliés par μ_r, (pour un point surélevé). Si le profil présente plusieurs points analogues on additionne à la suite du facteur μ_r les mêmes quantités relatives à la deuxième surélévation.

Les valeurs de μ et μ_r peuvent être déterminées facilement d'après les roues des wagonnets et les rouleaux porteurs, mais la rigidité du câble ne repose sur aucune donnée bien définie. Elle dépend des diamètres du câble et des fils, du mode de construction, des efforts de tension, du diamètre du rouleau et de l'angle de déviation. Ces deux dernières influences peuvent être représentées graphiquement par des courbes se rapprochant d'une parabole ; pour les autres on ne peut se baser que sur les résultats d'expériences.

Dans la construction des appareils de levage on admet généralement $\xi \backsim 0{,}25\ d$; cette valeur est toutefois dans le cas qui nous occupe beaucoup trop grande, car le câble ne repose toujours que faiblement sur les rouleaux porteurs et l'arc qu'il embrasse est très petit. Lorsque le câble ne vient qu'effleurer le rouleau, ce qui arrive souvent, on a naturellement $\xi = 0$. Quand la pression et l'angle de déviation du câble augmentent, la valeur de ξ croît d'abord très lentement et ses variations pourraient être représentées par une courbe analogue à une hyperbole. La pression du câble et l'arc embrassé restent toujours tellement faibles que la quantité ci-dessus valable pour un arc d'une demi ou d'un quart de circonférence n'est jamais atteinte. On obtient un résultat suffisamment exact en admettant pour le calcul des commandes :

$$\xi = 0{,}012\,d \quad \text{à} \quad 0{,}006\,d, \tag{26}$$

la plus petite valeur étant pour le cas où l'angle du câble est très faible.

18. Effort moteur. — Considérons un chemin aérien dans lequel le principal transport s'effectue de bas en haut, la station motrice étant à la partie supérieure ; l'effort moteur nécessaire est :

$$N = \frac{v\,(S_1 - S'_1)}{75}\ \text{HP}.$$

Si on remplace S_1 et S'_1 par leur valeur tirée de l'égalité (25) en considérant pour S_1 les signes supérieurs et pour S'_1 les signes inférieurs on a, en faisant intervenir l'égalité (24) :

$$(27) \qquad N = \frac{(Q_1 - Q_2)h}{270} + \frac{Sv}{37,5}\left[\mu_r\left(\frac{b_0}{a_0} - \frac{b_z}{a_z}\right) + \frac{4\xi z}{D}\right]$$

$$+ \left[\frac{qv}{37,5} + \frac{Q_1}{270}\left(1 + \frac{2p_1}{P_1}\right) + \frac{Q_2}{270}\left(1 + \frac{2p_2}{P_2}\right)\right] \cdot \left[\mu l + \frac{4\xi}{D} \cdot H_2\right.$$

$$\left. + \mu\left(\frac{b_z}{a_z} \cdot H_z - \frac{b_0}{a_0} h_x - \left(\frac{b_1^2}{a_1} + \frac{b_2^2}{a_2} + \ldots + \frac{b_{z-1}^2}{a_{z-1}}\right)\right)\right].$$

Dans cette équation S représente la tension initiale du câble déterminée par le dispositif de tension, z le nombre moyen de rouleaux chargés en même temps par le câble tracteur ; les autres valeurs sont données au chapitre 17 et dans la figure 30.

Lorsqu'on a plusieurs surélévations à traverser, on additionne la valeur trouvée pour chacune d'elles à la valeur donnée μ_r. L'égalité est valable pour la traversée des stations intermédiaires ou d'angle et pour l'enroulement autour des poulies de renvoi des stations terminales, la valeur de μ_r étant modifiée toutefois en conséquence.

Dans le cas où la station motrice ne se trouve pas à la partie supérieure comme nous l'avons supposé, la valeur de N reste la même et S représente alors la plus faible tension du câble tracteur.

Si le transport principal s'effectue de haut en bas, Q_2 est la charge la plus importante du transporteur, N devient souvent négative et la force obtenue doit être freinée. Le chemin aérien fonctionne alors seul sans force motrice.

Les tensions S_1 et S'_1 qui agissent sur la poulie motrice sont données par l'égalité (25). Par suite de l'adhérence sur la poulie on a entre ces deux forces la relation suivante :

$$(28) \qquad S_1 = S'_1 \cdot e^{\mu_0 \alpha},$$

dans laquelle μ_0 est le coefficient d'adhérence au repos entre le câble et la poulie, α l'angle correspondant à l'arc embrassé par le câble sur cette poulie.

Afin de pouvoir transmettre une plus grande force, on recouvre la gorge de la poulie motrice par une garniture en cuir. D'après les essais de Koettgen effectués avec une poulie à garniture en cuir humide et un câble à torons aplatis graissé normalement, la valeur de $\mu_0 = 0,16$.

Pour avoir une sécurité plus grande on calcule généralement les câbles ronds en employant le même coefficient. La valeur $\mu_0 \backsim 0,25$ que l'on emploie souvent dans le calcul des transmissions repose sur une théorie fausse de Morin basée sur ses essais [1].

Dans les transporteurs de faible longueur avec petites charges unitaires, le câble tracteur n'embrasse que la moitié de la poulie. Si l'on fait dans l'égalité (28) $\mu_0 = 0,16$ et $\alpha = \pi$ on a :

$$\frac{S_1}{S'_1} = 1,65 \tag{29}$$

comme rapport maximum entre les deux tensions et dans ce cas le contact sur la demi-poulie suffit.

Le nombre de chevaux qui peut être ainsi transmis est de :

$$N = (S_1 - S'_1)\frac{v}{75}$$

et si on remplace S'_1 par sa valeur donnée par l'égalité précédente on obtient :

$$N_{max} \backsim \frac{5,3}{1\,000} S_1 v. \tag{29 a}$$

Dans les grands chemins aériens le débit que peut réaliser ainsi le câble tracteur est trop faible, et on adopte alors le dispositif représenté par la

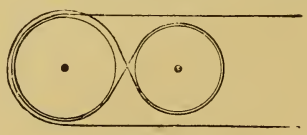


Fig. 33.

figure 33 qui augmente l'arc embrassé d'environ $2,75\pi$. On a dans ce cas comme rapport maximum entre les deux forces agissant à la circonférence de la poulie :

$$\frac{S_1}{S'_1} \backsim 4 \tag{30}$$

---

[1] Herrmann. — *Glückauf*, 1905, p. 846.

et comme nombre maximum de chevaux pouvant être transmis en toute sécurité :

$$N_{max} \backsim \frac{1}{100} S_1 v. \tag{30 a}$$

Si l'on doit atteindre un très grand débit avec des grosses charges, on emploie une poulie motrice à trois gorges et une poulie de renvoi avec deux. La longueur circonférencielle ainsi enveloppée par le câble tracteur est d'environ $5,5\pi$ et dans ce cas la garniture en cuir est superflue. Le coefficient de frottement entre le câble gras et la poulie en fonte étant égal à 0,10 on atteint en toute sécurité le rapport :

$$\frac{S_1}{S'_1} = 5,6. \tag{31}$$

Comme dans la pratique les valeurs des coefficients de frottement et des tensions du câble tracteur peuvent être différentes de celles déterminées dans les calculs précédents, pour avoir une sécurité très grande on ne prendra que les $\frac{8}{10}$ des valeurs données ci-dessus.

IV. — *Fatigue réelle des câbles.*

19. Câbles spiroïdaux. — On peut représenter schématiquement le câble tendu par la figure 34.

Dans le présent paragraphe nous représenterons par :

Q, la charge totale en kilogrammes ;

$P = \frac{Q}{m}$ la partie de celle-ci que supporte un fil en kilogrammes,

l, la longueur du tronçon de câble en centimètres ;

r, le rayon moyen de l'hélice en centimètres ;

h, le pas de l'hélice en centimètres ;

φ, l'angle de projection de l'hélice, dont la valeur s'élève à 2π pour un pas complet h et à $i2\pi$ pour la longueur totale l, i étant une fraction quelconque ;

w, l'angle de pente de l'hélice donné par la formule,

$$\text{cotg}\, w = \frac{h}{2\pi r};$$

$ds = \frac{r}{\sin w} d\varphi$, un élément de l'hélice dont la courbure principale normalement à l'axe est de :

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\sin^2 w}{r};$$

F, la section du fil en cm² ;

R_a, la pression exercée sur la surface extérieure du fil par la couche superposée en kg/cm ;

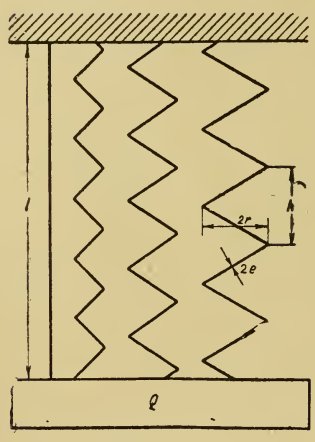


Fig. 34.

R_i, la pression sur la face intérieure du fil en kilogrammes-centimètres, (Pour deux couches de fils voisines, contenant respectivement z_1 et z_2 fils on a la relation : $z_1 R_{a1} = z_2 R_{i2}$);

E, module d'élasticité longitudinale de la matière du fil = 2 150 000 kilogrammes par centimètre carré ;

G, le module d'élasticité transversale du fil = 0,385 E^{kg} par cm² ;

e, la distance du centre de gravité de F à la couche extérieure du fil en centimètres ;

J_x, le moment d'inertie de F rapporté à l'axe polaire perpendiculaire à r en cm² ;

J_y, le moment d'inertie de F rapporté à l'axe polaire perpendiculaire à l'axe x en cm² ;

La force latérale P cos w parallèle à la direction de ds détermine un allongement de l'élément égal à :

$$\delta\, ds = \frac{P \cos \times w}{EF}\, ds$$

et donne en outre un moment de flexion

$$M_b = P\, r \cos w,$$

de sorte que l'élément ds prend une courbure

$$\frac{1}{\rho_1} = \frac{1}{\rho} - \frac{Pr \cos w}{EF\, \varkappa \rho^2}.$$

Comme ρ est toujours grand comparé au diamètre du fil on peut écrire :

$$\varkappa \rho^2 \sim i^2 = \frac{e^2}{\zeta_1},$$

expression dans laquelle i est le rayon d'inertie de la section par rapport à l'axe des x et ζ_1 un coefficient;

pour la section circulaire $\zeta_1 = 4$,

» $\zeta_1 = 2{,}55$,

» $\zeta_1 \sim 2{,}2$

» $\zeta_1 \sim 1{,}7$.

Par suite de l'allongement de l'élément il se produit un abaissement dans la direction de P égal à

$$d\lambda_1 = \delta\, ds \cos w = \frac{P \cos^2 w}{EF}\, ds.$$

L'angle d'inclinaison de la section terminale ds s'élève à $d\psi - d\psi_1$ tel que :

$$ds = \rho\, d\psi = \rho_1\, d\psi_1$$

devient

$$d\psi - d\psi_1 = ds \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_1}\right)$$

et provoque ainsi l'abaissement d'un point de l'axe,

$$d\lambda_2 = r ds \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_1}\right) \cos w = \frac{Pr^2 \cos^2 w \zeta_1}{EF\, e^2}\, ds.$$

L'autre force latérale P sin w, tombant dans la section F provoque un abaissement

$$d\lambda_3 = \frac{P \sin^2 w}{GF}\, ds,$$

et le moment $P\ r \sin w$ produit une rotation des deux extrémités de ds s'élevant à

$$d\theta = \frac{Pr \sin w}{G} \cdot \frac{\zeta_2}{4} \cdot \frac{J_p}{J_x \cdot J_y}\ ds.$$

D'après les expériences de Bach nous poserons :

pour la section circulaire : $\zeta_2 = 1$,
» rectangulaire et sections analogues : $\zeta_2 = 1{,}2$,
» en Z, d'une façon approximative : $\zeta_2 \sim 1{,}5$.

Un point de l'axe du câble relié invariablement à la section extrême de celui-ci s'abaisse par suite de

$$d\lambda_4 = rd\ \theta \sin w = \frac{Pr \sin^2 w}{GJ_x} \cdot \frac{\zeta_2}{4}\left(1 + \frac{J_x}{J_y}\right) ds.$$

L'influence de la force $(R_a - R_i)\ ds$, qui cherche à produire une variation de ρ est négligeable. Par contre on ne doit pas négliger le frottement $\mu\ (R_a + R_i)\ ds$ qui empêche l'extension du fil, et si on en tient compte il vient pour l'allongement total de l'hélice libre, avec

$$ds = \frac{r}{\sin w}\ d\varphi$$

$$d\lambda = \frac{Prd\varphi}{EF \sin w}\Bigg\{\cos^2 w - \cos w \cdot \mu\ \frac{R_a + R_i}{P} + 2{,}6 \sin^2 w - \sin w \cdot \mu\ \frac{R_a + R_i}{P}$$
$$+ \cos^2 w\ \zeta_1 \frac{r^2}{e^2} + \sin^2 w\ \frac{\zeta_1 \zeta_2}{4}\left(1 + \frac{J_x}{J_y}\right) 2{,}6\ \frac{r^2}{e^2}$$
$$+ \cos w \cdot \zeta_1 \frac{r^2}{e^2}\ \mu \left[\frac{R_a + R_i}{P} - \sin w\ \frac{\zeta_1 \zeta_2}{4}\left(1 + \frac{J_x}{J_y}\right)\right] 2{,}6\ \frac{r}{e}\ \mu \cdot \frac{R_a + R_i}{P}\Bigg\}.$$

L'intégration pour la longueur totale $l = ih$ donne

$$\lambda = \frac{Pl}{EF}\Bigg\{\underset{(1)}{\cos w} + 2{,}6\ \underset{(3)}{\frac{\sin w}{\operatorname{cotg} w}} + \zeta_1 \frac{r^2}{e^2}\Bigg[\underset{(2)}{\cos w}$$
$$+ 2{,}6\ \underset{(4)}{\frac{\sin w}{\operatorname{cotg} w}\ \frac{\zeta_2}{4}\left(1 + \frac{J_x}{J_y}\right)}\Bigg] - \mu\ \frac{R_a + R_i}{P}\Bigg[\underset{(1)}{1}$$
$$+ \underset{(3)}{\frac{2{,}6}{\operatorname{cotg} w}} + \zeta_1 \frac{r}{e}\left(1 + \underset{(2)}{\frac{2{,}6}{\operatorname{cotg} w}}\ \underset{(4)}{\frac{\zeta_2}{4}\left(1 + \frac{J_x}{J_y}\right)}\right)\Bigg]\Bigg\}.$$

Les chiffres entre parenthèses indiquent la provenance de chacun des membres comme suit :

(1)	de la fatigue à la traction
(2)	» à la flexion
(3)	» au cisaillement
(4)	» à la torsion.

La formule précédente est valable pour un fil isolé.

Un câble comprend plusieurs couches distinctes formées chacune d'elles par un certain nombre de fils serrés les uns contre les autres. Considérons d'abord le câble « Simplex » représenté par la figure 7 ; la force R_a disparaît et R_i est remplacée par la pression latérale produite par les fils en forme de coins. En même temps que l'hélice s'allonge dans la direction de son axe, il se produit une contraction notable dans le sens du diamètre par suite des moments (2) et (4), ce qui détermine un serrage énergique des fils les uns sur les autres. Quoique la contraction des fils soit empêchée par la résistance de la matière, elle est toutefois beaucoup plus forte que pour les câbles à noyau plein et la tension de flexion résultante est de même très importante (voir paragraphe 6).

Dans un câble plein la diminution du diamètre des spires est très faible. Les fils étant enroulés les uns sur les autres avec une certaine tension, leurs spires varient d'autant moins sous l'influence de la charge du câble et de la contraction transversale simultanée de la fatigue normale que le diamètre $2e$ est petit. Lorsque l'état final de contraction est atteint, le câble ne peut plus s'allonger sous l'action des moments (2) et (4) car celle-ci est contrebalancée par les réactions intérieures. Nous devons donc introduire dans l'équation précédente un faible coefficient $\frac{A}{n'}$, qui intéressera les membres provenant des moments (2) et (4). La contraction d'une spire étant d'autant plus grande qu'il y a plus de fils dans sa section, il en résulte que le nombre n' dépend du rapport $\frac{r}{e}$ soit $n' = n\frac{r}{e}$.

En introduisant ce coefficient, ainsi que $P = \frac{Q}{m}$, dans l'équation désignée nous obtenons :

$$(32) \qquad \frac{\lambda}{l} = \frac{Q}{m\,EF} \left\{ \cos w + 2{,}6 \frac{\sin w}{\operatorname{cotg} w} + \frac{\zeta_1}{n} \frac{r}{e} \left[\cos w \right.\right.$$

$$\left. + 2{,}6 \frac{\sin w}{\operatorname{cotg} w} \frac{\zeta_2}{4} \left(1 + \frac{J_x}{J_y}\right)\right] - \mu m \frac{R_a + R_i}{Q} \left[1 \right.$$

$$\left.\left. + 2{,}6 \frac{1}{\operatorname{cotg} w} + \frac{\zeta_1}{n} \left(1 + 2{,}6 \frac{1}{\operatorname{cotg} w} \frac{\zeta_2}{4} \left(1 + \frac{J_x}{J_y}\right)\right)\right]\right\}.$$

On pourrait calculer la valeur de n en partant du rapport de la contraction connue d'une hélice libre à la contraction transversale d'un fil. Cette manière de procéder conduisant à des calculs longs et difficiles que l'on doit vérifier ensuite par l'expérience, il est plus simple de partir immédiatement de résultats d'essais connus faits avec des tronçons de câbles convenablement choisis.

Les mesures furent effectuées sur un câble semi-clos de 35 millimètres de diamètre avec fils ronds d'environ 5 millimètres ayant $0^{cm^2},1964$ de

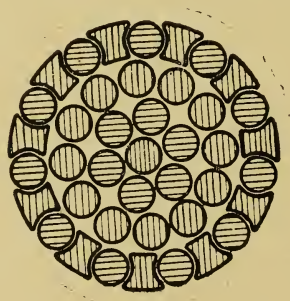


Fig. 35.

section, et fils spéciaux d'environ $0^{cm^2},20$ de section transversale (fig. 35).

Les allongements de ce tronçon de câble de 1 733 millimètres de longueur furent proportionnels à la charge Q ; ils sont reportés graphiquement par la figure 36. Les résultats de plusieurs essais successifs se recouvrirent avec une grande exactitude jusqu'à 22 tonnes, charge maximum que pouvaient supporter les attaches de câbles.

Comme on peut le remarquer, les allongements sont directement proportionnels aux charges. Lorsque le câble est déchargé, par suite du frottement intérieur la courbe se trouve relevée parallèlement à la première comme l'indique la figure. En désignant par F_s la somme de toutes les

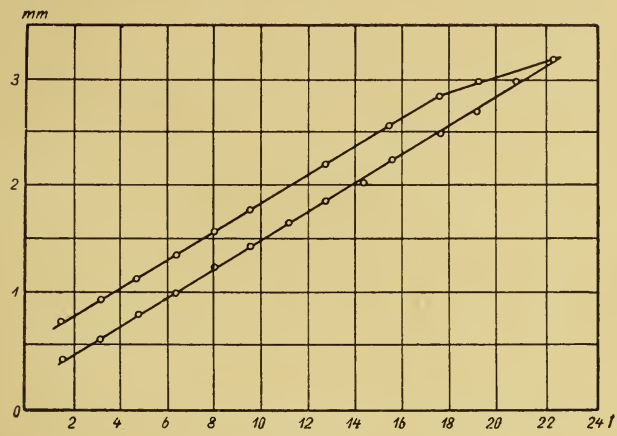


Fig. 36.

sections de fils du câble et par E_s le coefficient d'élasticité du câble, nous tirons de l'équation

$$\frac{\lambda}{l} = \frac{Q}{E_s F_s}$$

$E_s = 0{,}773\ E$, en supposant $E = 2\,150\,000$

La valeur ainsi obtenue est notablement supérieure à celle de 0,60 E indiquée par Hrabàk.

La distance des deux courbes d'allongement de la figure 35 indique le double de l'influence du terme désigné par μ dans la formule principale. Dans le câble soumis aux essais, on avait, pour les deux premières couches cotg. $w \sim 3{,}60$ soit $w \sim 15°30'$ et pour la troisième cotg $w \sim 2{,}80$ soit $w \sim 19°40'$; en faisant $\mu = 0{,}2$ on a :

$$\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{l} = \frac{2\mu}{EF}\left(R_a + R_i\right)\left[1 + \frac{2{,}6}{\text{cotg}\ w} + \frac{\zeta_1}{n}\left(1 + \frac{2{,}6}{\text{cotg}\ w}\,\frac{\zeta_2}{4}\left(1 + \frac{J_x}{J_y}\right)\right)\right]$$

Pour la couche 3 *a* de 10 fils profilés spéciaux
$$\begin{cases} R_a = 0 \\ R_i \backsim \dfrac{109}{1 + \dfrac{1,89}{n}}, \end{cases}$$

Pour la couche 3 *b* de 10 fils ronds
$$\begin{cases} R_a = 0 \\ R_i \backsim \dfrac{111}{1 + \dfrac{3,04}{n}}, \end{cases}$$

Pour la couche 2 de 12 fils ronds
$$\begin{cases} R_a = \left(\dfrac{109}{1 + \dfrac{1,89}{n}} + \dfrac{111}{1 + \dfrac{3,04}{n}} \right) \dfrac{10}{12} \\ R_a + R_i \backsim \dfrac{125}{1 + \dfrac{3,17}{n}}, \end{cases}$$

Pour la couche 1 de 6 fils on a de même $R_a + R_i \backsim \dfrac{125}{1 + \dfrac{3,17}{n}}$.

Comme on peut le remarquer, la pression latérale sur les fils n'augmente que très peu en avançant vers l'intérieur, parce que les couches du milieu sont de plus en plus lâches.

Nous pouvons maintenant déterminer le facteur m, qui indique la portion de la charge totale supportée par un fil. On obtient en partant de l'équation principale (32) :

pour la couche 3 *a* : $m\left(0,133 + \dfrac{170}{q}\right) = 5,07\left(1 + \dfrac{12,3}{n}\right)$

» » 3 *b* : $m\left(0,133 + \dfrac{169}{q}\right) = 5,15\left(1 + \dfrac{21,0}{n}\right)$

» » 2 : $m\left(0,133 + \dfrac{177}{q}\right) = 4,75\left(1 + \dfrac{14,7}{n}\right)$

» » 1 : $m\left(0,133 + \dfrac{177}{q}\right) = 4,75\left(1 + \dfrac{7,35}{n}\right)$.

Le fil intérieur droit *o* est tendu jusqu'à sa limite de rupture. On choisissait autrefois pour ce fil une matière ductile et très élastique, alors que maintenant on adopte le même acier que pour les couches extérieures. Il en résulte que ce fil supporte une charge plus grande, ce

qui donne pour une résistance de rupture $K_z = 11\,500$ kilogrammes par centimètre carré, une fatigue égale à 6 500 kilogrammes par centimètre carré, c'est-à-dire la limite d'élasticité. En faisant $\sigma_s \backsim 2\,900$ kilogrammes par centimètre carré, limite d'élasticité d'un acier doux, on a pour la couche *o*

$$m = 1{,}77 \times 10^{-3}\,Q.$$

L'emploi de la même matière est pratique pour la construction des câbles mais pour la bonne répartition de la fatigue l'ancienne fabrication est préférable.

La valeur de n encore inconnue est obtenue en admettant que la somme des charges des fils est égale à la charge du câble, c'est-à-dire : $\Sigma \frac{Q}{m} = Q$; en divisant les deux membres par Q on a dans le cas qui nous occupe :

$$\frac{10}{m_{3a}} + \frac{10}{m_{3b}} + \frac{12}{m_2} + \frac{6}{m_1} + \frac{1}{m_0} = 1.$$

Le calcul montre, comme c'était à prévoir d'ailleurs, que n dépend de Q, car au fur et à mesure que la charge augmente les spires se resserrent les unes sur les autres et les moments de flexion et de rotation influent de moins en moins sur l'allongement du câble. On obtient pour :

$Q = 10$	12,5	15 tonnes
$n \backsim 62{,}4$	70,0	88,1.

La figure 37 représente graphiquement les variations de n ; pour ne

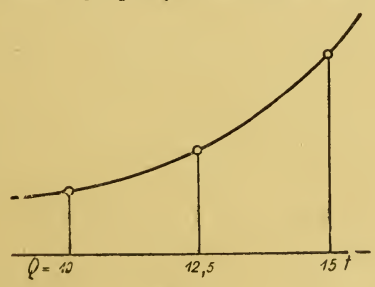


Fig. 37.

pas avoir une figure trop grande nous avons pris l'ordonnée 50 comme axe horizontal.

Pour chaque fil on obtient les valeurs de m suivantes :

Q =	10	12,5	15 tonnes
Couche 3 *a* (fils profilés)	40,3	40,6	40,0 »
	(41,0)	(41,4)	(40,7) »
Couche 3 *b* (fils ronds)	45,8	45,6	44,1 »
» 2 »	38,8	39,0	38,2 »
» 1 »	35,2	35,6	35,5 »
» 0 (fil droit)	17,7	22,1	26,6 »

On avait également fait des essais analogues avec un câble de construction close, (fig. 38), ayant la même résistance à la rupture que le précédent, mais dont les spires étaient beaucoup moins resserrées. Ce

Fig. 38.

câble était composé d'une couche de 6 fils ronds de $3^{mm},7$ de diamètre enroulés autour d'une âme cylindrique flexible de même diamètre, d'une deuxième couche de 12 fils égaux aux précédents, de 21 fils en forme de coins de $3^{mm},7$ de hauteur ayant chacun une section de $0^{cm^2},0925$, enfin à l'extérieur d'une couche de fils à section en Z d'environ $0^{cm^2},191$ et de $5^{mm},2$ de hauteur. L'angle de pente de chaque couche était respectivement de

(1)	(2)	(3)	(4)
15°	16°10′	19°50′	20°.

Les essais effectués sur un tronçon de 2418 millimètres de longueur ont donnés entre la charge et l'allongement les relations représentées graphiquement dans la figure 39, de laquelle il résulte que

$$E_s = 0,60\ E.$$

Les deux courbes d'allongement pour la charge montante et la charge

descendante ont été déterminées par plusieurs essais successifs, et leur distance donne comme dans le cas précédent :

pour la couche (4) des fils en Z $R_a = 0$

$$R_i \sim \frac{176}{1 + \frac{1,44}{n}}$$

pour la couche (3) des fils en coins $R_a + R_i \sim \frac{86}{1 + \frac{1,45}{n}}$

pour la couche (2) des fils ronds $R_a + R_i \sim \frac{110}{1 + \frac{3,14}{n}}$

pour la couche (1) des fils ronds $R_a + R_i \sim \frac{110}{1 + \frac{3,14}{n}}$.

Fig. 39.

La différence entre les valeurs relatives aux couches (4) et (3) est dé-

terminée par la grande largeur des fils à section en Z et la faible largeur des fils en coin.

Pour la détermination du facteur m on a les égalités suivantes :

$$\text{pour la couche 4 :} \quad m\left(0{,}160 + \frac{274}{Q}\right) = 5{,}06\left(1 + \frac{12{,}5}{n}\right)$$

$$3 : \quad m\left(0{,}078 + \frac{133}{Q}\right) = 5{,}03\left(1 + \frac{15{,}4}{n}\right)$$

$$2 : \quad m\left(0{,}090 + \frac{155}{Q}\right) = 4{,}68\left(1 + \frac{14{,}6}{n}\right)$$

$$1 : \quad m\left(0{,}090 + \frac{155}{Q}\right) = 4{,}47\left(1 + \frac{7{,}5}{n}\right)$$

$$0 : \quad m = 3{,}04 \times 10^{-3}\, Q,$$

en admettant que la limite d'élasticité de l'âme soit de 3000 kilogrammes par centimètre carré.

De l'égalité :

$$\frac{21}{m_4} + \frac{21}{m_3} + \frac{12}{m_2} + \frac{6}{m_1} + \frac{1}{m_0} = 1$$

on tire pour :

$Q =$	10	12,5	15 tonnes
$n \sim$	21,1	23,3	24,9

c'est-à-dire des valeurs à peine égales au 1/3 de celles trouvées pour le

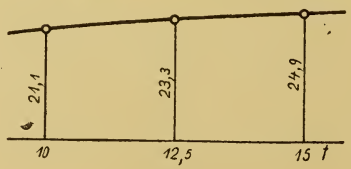


Fig. 40.

premier câble. La figure 40 donne graphiquement les valeurs de n au fur et à mesure que Q varie. On a finalement pour m les valeurs suivantes :

Charge du câble Q =	10	12,5	15 tonnes
Couche 4 (fils à section en Z)	42,9	42,6	42,5 »
	(76,2)	(75,7)	(75,5) »
» 3 (fils en coin)	95,6	94,6	94,0 »
	(82,3)	(81,5)	(80,9) »
» 2 (fils ronds)	75,0	74,3	73,8 »
» 1 (fils ronds)	57,4	57,5	57,7 »
» 0 (âme)	30,4	36,5	45,6 »

Comme on voit la répartition de la charge est très irrégulière. En rapportant tous ces valeurs à la section des fils ronds, de façon à avoir la charge pour la même section de chaque couche, on obtient les résultats entre parenthèses.

On a pris ensuite un morceau de câble spiroïdal, (fig. 41) de 37 fils

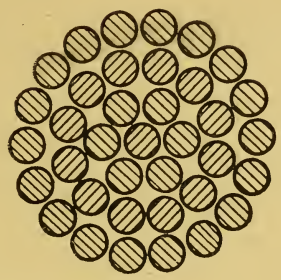


Fig. 41.

ronds ayant chacun 5 millimètres de diamètre, la matière de ce tronçon de 1 163 millimètres de longueur avait une résistance à la rupture de 7 000 à 7 500 kilogrammes par centimètre carré et les spires étaient

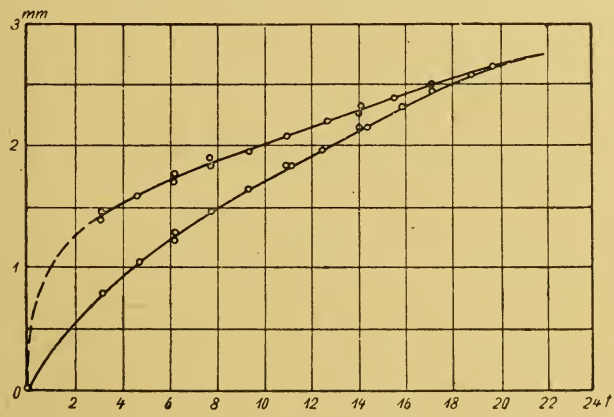


Fig. 42.

très peu serrées. Plusieurs essais successifs ont donné les deux courbes d'allongement représentées par la figure 42 pour charges montante et descendante.

On voit ainsi que l'allongement est très important dans la partie où les spires ont été peu resserrées, et augmente ensuite peu à peu avec la charge. Si on calcule le coefficient d'élasticité E_s pour chaque charge, on

obtient la courbe représentée par la figure 43. Dans la pratique, lorsqu'avec un tel câble on a une charge comprise entre 7 et 12 tonnes, on peut remplacer la courbe des valeurs de E_s par une droite, pour laquelle $E_s = 590\,000 + 35{,}5\,Q$. Dans l'allongement maximum mesuré on remarque un léger abaissement de la courbe qui est peut-être produit par l'ac-

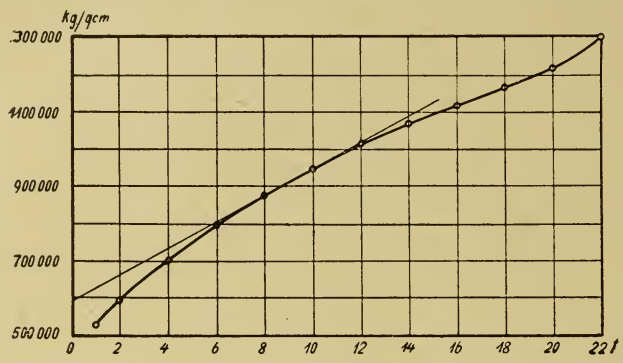


Fig 43.

croissement du coefficient de frottement μ sous l'action de la grande pression des spires l'une sur l'autre.

Une particularité des câbles à spires peu serrées est fournie par la courbe d'allongement de la charge descendante qui n'est pas parallèle à celle de la charge montante mais fait avec elle un angle constant. Si ΔQ_t représente la différence de charges mesurée en tonnes, de la figure 43 on tire :

$$\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{l} = \frac{0{,}033\,\Delta Q_t}{1\,163}$$

et

$$\frac{\lambda_1}{l} = \frac{0{,}711 + \frac{1}{10}\,Q_t}{1\,163}.$$

Avec ces égalités on a :

$$\text{Pour la couche 3 : } R_a + R_i = \frac{17{,}25\,Q_t}{1 + \frac{3{,}15}{n}},$$

$$\text{» » 2 : » } = \frac{16{,}55\,Q_t}{1 + \frac{3{,}11}{n}},$$

$$\text{» » 1 : » } = \frac{16{,}38\,Q_t}{1 + \frac{3{,}10}{n}}.$$

Les différences sont donc très faibles dans un câble composé de fils identiques.

Les valeurs du facteur m sont données par les égalités suivantes :

$$\text{Pour la couche 3 : } m\left(0{,}169 + \frac{1\,031}{Q}\right) = 4{,}65\left(1 + \frac{22}{n}\right),$$

$$\text{» » 2 : » } = 4{,}78\left(1 + \frac{14{,}4}{n}\right),$$

$$\text{» » 1 : » } = 4{,}82\left(1 + \frac{7{,}16}{n}\right),$$

$$\text{» » 0 : } m = 1{,}70 \times 10^{-3} \times Q,$$

si dans ce cas également on admet pour le noyau $\sigma_s = 3\,000$ kilogrammes par centimètre carré.

De l'égalité :

$$\frac{18}{m_3} + \frac{12}{m_2} + \frac{6}{m_1} + \frac{1}{m_0} = 1$$

on tire pour :

$Q =$	7,5	10	12,5	15 tonnes.
$n =$	7,31	8,47	10,03	11,76,

c'est-à-dire de très petites valeurs, dont les relations avec Q sont données

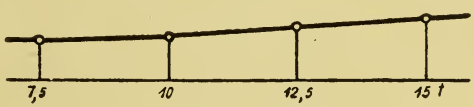


Fig. 44.

graphiquement par la figure 44. On a finalement pour m le tableau suivant :

Charge du câble Q.	7,5	10	12,5	15 tonnes
Couche 3	60,6	61,5	58,8	56 »
» 2	46,3	47,4	46,1	44,7 »
» 1	31,1	32,6	32,8	32,5 »
» 0 (âme)	12,8	17,0	21,2	25,5 »

La charge des fils extérieurs est environ la moitié de celle des fils qui entourent l'âme.

Les valeurs de m ainsi déterminées donnent seulement la portion de la charge totale que doit supporter chaque fil. La fatigue réelle n'est pas encore connue et pour la déterminer on doit reprendre le calcul de λ.

La section F de fil est soumise à un effort de traction sous l'action de la force P cos w. — $\mu(R_a + R_i)$ et la fatigue qui en résulte est :

$$\sigma_1 = \frac{P}{F}\left[\cos w - \frac{\mu(R_a + R_i)}{P}\right]. \tag{34}$$

à laquelle vient s'ajouter la fatigue à la flexion déterminée par le moment :

$$\frac{1}{n'}\left[P \cos w \,.\, r - \frac{1}{2}\mu(R_a + R_i) \times 2e\right].$$

Dans cette expression on a remplacé $\mu R_a e_1 + \mu R_i e_2$ par la valeur moyenne de ces deux forces ; cette substitution simplifie les calculs et influe très peu sur les résultats relatifs aux fils extérieurs. Si l'on considère le tronçon comme une barre droite, on obtient comme fatigue maximum à la flexion :

$$\sigma_2 = \frac{P \cos w \,.\, r - \mu(R_a + R_i)e}{Wn\frac{r}{e}}$$

en faisant $W = \zeta_3 F e$:

$$\sigma_2 = \frac{P}{n\zeta_3 F}\left[\cos w - \frac{\mu(R_a + R_i)}{P}\frac{e}{r}\right]. \tag{35}$$

On obtient d'une façon analogue la fatigue au cisaillement :

$$\tau_3 = \frac{P}{\zeta_4 F}\left[\sin w - \frac{\mu(R_a + R_i)}{P}\right]. \tag{36}$$

dans laquelle ζ_4 doit être multiplié par F afin d'obtenir la plus grande valeur de la fatigue, qui ne se répartit pas uniformément dans toute la section et atteint son maximum aux points situés sur le rayon de l'hélice.

On doit encore considérer la fatigue à la torsion :

$$\tau_4 = \frac{P \sin w\, r - \frac{\mu(R_a + R_i)}{2}2e}{n' W_d}$$

si W_d est le module de résistance à la torsion de la section qui donne la

fatigue maximum pour les fibres extérieures situées sur le rayon r des spires. Faisons de nouveau $W_d = \zeta_5 Fe$, on aura :

$$(37) \qquad \tau_4 = \frac{P}{\zeta_5 nF}\left[\sin w - \frac{\mu(R_a + R_i)}{P}\frac{e}{r}\right].$$

En additionnant les différentes fatigues de même genre et en considérant que $P = \frac{Q}{m}$:

$$(38) \quad \sigma = \sigma_1 + \sigma_2 = \frac{1}{F}\left[\frac{Q\cos w}{m}\left(1 + \frac{1}{n\zeta_3}\right) - \mu(R_a + R_i)\left(1 + \frac{e}{\zeta_3 nr}\right)\right]$$

de même :

$$(39) \quad \tau = \tau_3 + \tau_4 = \frac{1}{F}\left[\frac{Q\sin w}{m}\left(\frac{1}{\zeta_4} + \frac{1}{n\zeta_5}\right) - \mu(R_a + R_i)\left(\frac{1}{\zeta_4} + \frac{e}{\zeta_5 nr}\right)\right].$$

Pour les différentes sections de fil on a les valeurs suivantes de ζ (les quantités entre parenthèses ne sont qu'approchées) :

Sections				
ζ_3	0,25	0,4	0,38	0,60
ζ_4	0,75	(0,65)	0,66	0,61
ζ_5	0,50	(0,45)	0,46	(0,3)

A ces fatigues déterminées par le fonctionnement de l'installation on doit encore en ajouter différentes autres introduites au moment de la construction du câble.

Il existe tout d'abord une certaine tension initiale P_0 déterminée par le tambour de la machine à enrouler et ensuite un moment fléchissant M_0 par rapport à l'âme et à la couche intérieure.

Ce dernier imprime au fil une courbure $\rho = \frac{r}{\sin^2 w}$ et aux fibres extérieures une fatigue de flexion :

$$\sigma_b' = \frac{Ee}{\zeta} = \frac{Ee\sin^2 w}{r}$$

qui est très grande. Pour les trois catégories de fils ronds du câble de construction semi-close par exemple elle est égale à :

$\sigma_b' = 74\,800$ kg/cm² dans la couche 1, avec $\varepsilon = 3{,}57$ %
» $= 38\,200$ » » 2, » $= 1{,}82$ »
» $= 41\,000$ » » 3, » $= 1{,}95$ »

Ces valeurs de fatigue à la flexion sont naturellement inadmissibles, elles ont été calculées en admettant la loi de Hooke c'est-à-dire que les fatigues sont toujours proportionnelles aux allongements. En réalité ces chiffres montrent seulement que les allongements donnés ci-après existent dans les fibres extérieures.

Si l'on veut tracer la courbe des tensions, la valeur de σ'_b obtenue donne l'inclinaison de la première partie de la courbe des fatigues réelles σ_b et l'échelle à laquelle elle doit être reproduite. Cette courbe se continue à

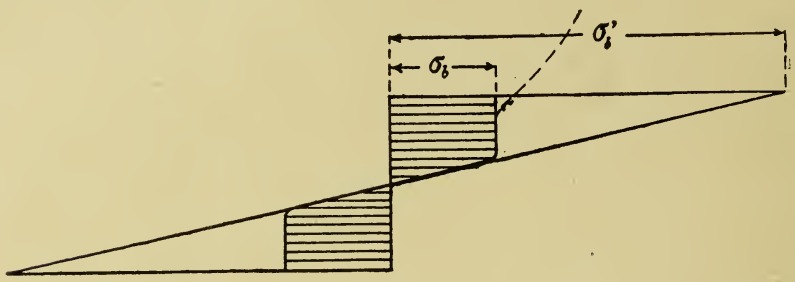


Fig. 45.

peu près comme l'indique le pointillé ; cependant dans le cas d'aciers ne dépassant pas 12.000 kgr. de résistance à la rupture par centimètre carré, tels que ceux des câbles spiroïdaux ordinaires, on a une courbe assez prononcée qui, dans le cas de la grande échelle des allongements (fig. 45) arrive presque jusqu'à la limite de la section, de sorte que pour simplifier les calculs on peut admettre que $\sigma_b = \sigma_s$. De plus on peut déduire de la figure 45 que la limite d'élasticité de la matière du câble est déjà dépassée dans les fibres relativement rapprochées de l'axe.

A cette tension de flexion initiale de fil viennent s'ajouter les fatigues $\sigma_z = \frac{P_0}{F}$ déterminées par le frein et réparties uniformément dans toute la section. Eltes opèrent un déplacement de la ligne neutre des centres de gravité vers le centre de courbure de la barre primitivement droite, de la quantité $y_0 = e \frac{\sigma_z}{\sigma'_b}$. La représentation des tensions normales donne ainsi le diagramme de la figure 46 *a* et les allongements correspondants de la figure 46 *b*.

La plus grande valeur de P_0 admissible est celle qui correspond à la limite d'élasticité σ_s de la matière, avec laquelle on a, dans la cas du

câble pris comme exemple, un allongement de 0,4 %. La force P_0 détermine une pression R_i qui tend à appliquer les fils contre l'âme et qui est donnée par l'égalité $R_i = \frac{P_0 \sin^2 w}{r}$; P_0 étant à peu près proportionnelle à r, cette valeur de R_i est encore la même pour toute les couches si l'angle de pente de l'hélice est constant.

Lorsqu'on dépasse la limite d'élasticité on obtient une nouvelle position d'équilibre telle que les éléments conservent en partie leurs posi-

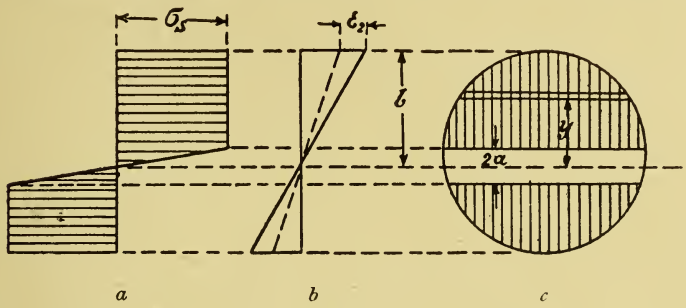


Fig. 46.

tions après l'allongement, même dans le cas où la force disparaît. Les déformations élastiques qui ont eu lieu jusqu'à la limite d'allongement disparaissent complètement : différents essais à la traction effectués par l'auteur avec des barres d'acier ont confirmé cette règle.

Lorsqu'on enlève la charge, le fil étant libre revient dans sa position initiale sous l'action du moment :

$$M_1 = \int \sigma df \times y = \frac{\sigma_s}{a} \int y^2 df + \sigma_s \int y df$$

$$= \sigma_s \left(\frac{J_1}{a} + S_2 \right).$$

(fig. 46, *c*) dans laquelle J_1 est le moment d'inertie de la portion de section correspondant aux allongements élastiques et S_2 le moment statique de la partie soumise aux efforts dépassant la charge, qui correspond à la limite d'allongement ; ces deux moments sont pris par rapport à l'axe neutre déplacé. On a admis que la limite d'élasticité de l'acier était égale à la limite d'allongement, car les déformations permanentes obtenues

avant que l'on ait atteint la limite d'allongement n'influent presque pas sur le résultat final.

Ce moment de réaction laisse les allongements de la coupe dans la position représentée en pointillé (fig. 46 *b*). Si on désigne par σ_2 la tension correspondant à l'allongement ε_2 de la fibre extérieure, en supposant la section transversale constante, on a le moment :

$$M_2 = \sigma_2 \frac{J}{b}$$

dans lequel J est le moment d'inertie de la section totale par rapport au plan neutre. En faisant ces deux moments égaux on a :

$$\sigma_2 = \sigma_s \frac{\frac{J_1}{a} + S_2}{\frac{J}{b}}$$

pendant que σ_s est l'effort de réaction réel en ce point, correspondant à la forme du fil dans sa nouvelle position d'équilibre.

Sans erreur importante on peut admettre que $\frac{J_1}{a} + S_2 \sim S$ et $\frac{J}{b} \sim W$, W étant le module de résistance de la section. L'égalité $\frac{\sigma_2}{\sigma_s} = \frac{S}{W}$ montre alors que σ_2 est toujours plus grand que σ_s. par conséquent lorsque la charge est complètement enlevée on a dans les fibres extérieures des fatigues en sens contraire dont la valeur approchée est :

(40 *a*) $$-\sigma\left(1 - \frac{S}{W}\right).$$

Pour faire les calculs exacts et dans le cas d'une section circulaire, faisons :

$$y_o = e\frac{\sigma_z}{\sigma_b} = \zeta_o \times e \qquad a = e\frac{\sigma_s}{\sigma_b} = \zeta_s \times e$$

$$b = e \pm y_o = e\,(1 \pm \zeta_o)$$

dans ces égalités le signe négatif s'applique aux fibres voisines du point neutre de courbure de la section, on a alors exactement pour la section circulaire :

(40 *b*) $$\sigma_2 = \sigma_s \times 0{,}85\,\frac{1 \pm \zeta_o}{1 + 4\,\zeta_o^2}\,(2 + 1{,}5\,\zeta_o^2 - \zeta_s^2).$$

En choisissant convenablement P_0 et P_1 on peut obtenir, dans les fibres les plus tendues au moment de la construction, une compression terminale de 0,8 σ_s à 0,7 σ_s et dans les fibres primitivement les plus comprimées une traction égale à 0,65 σ_s — 0,55 σ_s. On voit encore que si on arrive à maintenir à peu près les valeurs convenables de P_0 et P_1 à l'intérieur ceci suffit largement ; lorsque ces forces s'éloignent, même d'une certaine quantité, la valeur de σ_2 que l'on obtieut finalement varie très peu.

L'égalité 39 relative aux efforts de cisaillement doit être corrigée dans le même sens. Les tambours des machines à enrouler les câbles sont prévus de telle sorte que les fils ronds des câbles spiroïdaux et des noyaux des autres constructions ne subissent aucune torsion ; les fils de forme spéciale qui reposent toujours sur la partie centrale par leur même face sont par contre tordus de 360° par un pas d'hélice complet. On tire la valeur du moment nécessaire pour cet enroulement de la formule donnée précédemment pour $d\theta$, avec un angle égal à 2π

$$M'_o = \frac{4\,GJ_xJ_y \sin w}{\zeta_2 J_p r}$$

et le périmètre de la section subit un déplacement $\gamma = \frac{e \sin w}{r}$ correspondant à la tension $\tau_o = G\,\frac{e}{r} \sin w$. Les forces P_1 déterminent en outre les efforts de cisaillement et de torsion suivants :

$$\tau_o = \frac{P_1}{F}\left(\sin w - \cos w\right)\left(\frac{1}{\zeta_4} + \frac{e}{nr\zeta_5}\right)$$

qui s'ajoutent au précédent.

Le moment de la force de torsion intérieure est dans ce cas

$$M'_1 = \int \tau df \,.\, r'$$

dans lequel r' est la distance de l'élément df à l'axe neutre de la section. On a :

$$M'_1 = \frac{\tau_s}{a}\int r'^2 df + \tau_s \int r' df = \tau_s\left(\frac{J_{p1}}{a'} + S'_2\right),$$

égalité dans laquelle la distance a' et le moment S'_2 sont pris par rapport au centre de gravité.

De même $M'_2 = \tau_2 \times \frac{J_p}{e}$, et en égalant les deux valeurs de M'_1 et M'_2 on obtient

$$\tau_2 = \tau_s \frac{\frac{J_{p1}}{a'} + S'_2}{\frac{J_p}{e}}.$$

Si l'on fait $\frac{J_{p1}}{a'} + S'_2 \backsim S'$ on a :

$$\tau_2 = \tau_s \frac{S'e}{J_p}.$$

La fatigue donnée par l'égalité (39) doit être diminuée de la quantité :

(41) $$\tau_s \left(1 - \frac{S'e}{J_p}\right).$$

Aux tensions dont nous avons déjà parlé qui proviennent de la force longitudinale Q, on doit encore ajouter celle provoquée par la force transversale V. Sous l'action de cette dernière le câble se plie et son axe prend la forme représentée par la figure 47.

Si la tangente en un point quelconque de l'axe du câble fait un angle

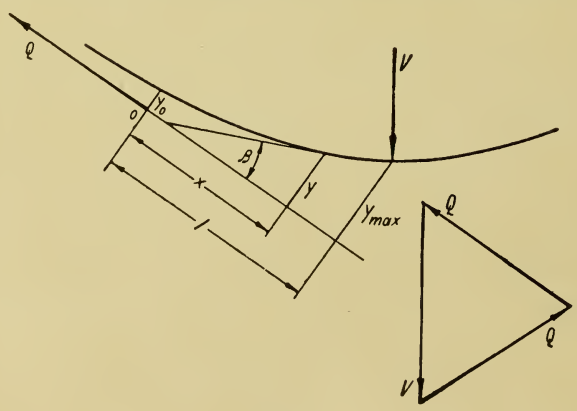


Fig. 47.

β avec la direction de la force Q, celle-ci se décompose en une force de traction Q cos β et un effort de cisaillement Q sin β. Comme les fils font avec la direction du câble un angle W égal à l'angle de pente de l'hélice, chacune des deux forces précédentes doit de nouveau être décomposée

suivant cet angle ; en admettant $P = \frac{Q}{m}$ on a comme effort de traction sur la section d'un fil :

$$P \cos \beta \cos w + P \sin \beta \sin w = P \cos (w - \beta)$$

et comme effort de cisaillement :

$$P \cos \beta \sin w + P \sin \beta \cos w = P \sin (w + \beta).$$

Dans la pratique l'angle β est toujours très petit, de sorte que les fatigues déjà déterminées σ_1 et τ_3 sont très peu augmentées par la flexion du câble.

Le moment fléchissant détermine par contre une déformation assez importante ; il agit sur tous les fils de telle sorte que l'on peut considérer le câble comme une pièce homogène. Dans une corde en chanvre à enroulements très peu serrés on peut remarquer qu'il faut dépasser de beaucoup la dimension admissible pour obtenir un mouvement des torons les uns par rapport aux autres.

Désignons par x la distance d'un point quelconque à l'origine et par y la distance en ce point de l'axe du câble à la direction de la force Q (fig. 47), on aura sur une section de fil un moment fléchissant $Py \cos w$ pendant que la force latérale $P \sin w$ déterminera un moment de torsion à l'extrémité du bras de levier y. Dans la déformation du câble les moments de torsion s'annulent.

Pour calculer la position que prend l'axe du câble sous l'action du moment fléchissant on emploie l'égalité connue qui est, dans ce cas, un peu modifiée par la réaction de chaque fil :

$$\frac{d^2 y}{dx^2} \times \Sigma EJ = \Sigma Py \cos w$$

ou

$$\frac{d^2 y}{dx^2} \times \Sigma EJ = y \Sigma P \cos w.$$

Pour résoudre cette équation posons $y = e^{ax}$, dans laquelle e est la base des logarithmes naturels, on a alors :

$$\frac{dx}{dy} = ae^{ax}$$

et

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = a^2 e^{ax}$$

d'où

$$\Sigma EJ\, a^2 e^{ax} = e^{ax}\, \Sigma P \cos w,$$

dans cette égalité qui est vraie pour toutes les valeurs de x faisons $x = o$, on aura :

$$\Sigma EJ\, a^2 = \Sigma P \cos w$$

ou

$$\alpha = \pm \sqrt{\frac{\Sigma P \cos w}{\Sigma EJ}}.$$

La solution générale de cette égalité fondamentale est :

$$y = C_1 e^{+ax} + C_2 e^{-ax}$$

si on fait $x = o$ on a pour l'origine

$$y_o = C_1 + C_2$$

comme la courbe du câble a pour asymptote l'axe des x, pour $x = -\infty$

$$y = o = C_1\, o + C_2\, e^{+a\infty},$$

ce qui nécessite que $C_2 = o$. On a alors :

$$y_o = C_1$$

ainsi que

$$y = y_o \times e^{ax}.$$

D'où

$$\frac{dx}{dy} = y_o a e^{ax}.$$

Pour $x = l$ la charge V reposant sur le câble, le triangle des forces donne :

$$\operatorname{tg} \beta_{max} = \frac{\frac{1}{2} V}{\sqrt{Q^2 - \frac{V^2}{4}}} \sim \frac{V}{2Q}$$

comme V est toujours petit par rapport à Q

$$\frac{dy}{dx_{max}} = \frac{V}{2Q} = y_o a e^{al}$$

de même

$$y_{max} = y_0 e^{al}.$$

En divisant les deux égalités l'une par l'autre on obtient :

$$y_{max} = \frac{V}{2aQ}$$

ou en remplaçant a par sa valeur ci-dessus

$$y_{max} = \frac{V}{2Q}\sqrt{\frac{\Sigma EJ}{\Sigma P \cos w}}. \tag{42}$$

Ce résultat diffère de celui d'Isaachsen seulement par le fait que Q est remplacé par $\Sigma P \cos w$.

Comme il s'agit de la déformation du câble entier, il paraît à première vue exact de poser $\Sigma EJ = E_s \Sigma J$, dans laquelle E_s est le cœfficient d'élasticité du câble déterminé par les essais précédents à la traction.

L'égalité

$$\Sigma P \cos w = Q\left(\frac{z_1 \cos w_1}{m_1} + \frac{z_2 \cos w_2}{m_2} + \ldots\right)$$

dans laquelle z est le nombre des fils semblables d'une même couche, donne alors avec la formule dérivée, dans le cas d'un câble de construction semi-close, lorsque $\Sigma J = 0{,}142$ cm⁴ ;

pour Q = 10 000 kilogrammes, V = 725 kilogrammes ; $y_{max} = 0{,}185$ cm.
» = 10 000 kilogrammes, V = 1 050 kilogrammes ; $y_{max} = 0{,}269$ cm.

dans le cas d'un câble de construction close avec $\Sigma J = 0{,}1384$ cm⁴

pour Q = 10 300 kilogrammes, V = 780 kilogrammes ; $y_{max} = 0{,}167$ cm.

dans le cas d'un câble spiroïdal avec $\Sigma J = 0{,}1135$ cm⁴

pour Q = 6 030 kilogrammes, V = 375 kilogrammes ; $y_{max} = 0{,}146$ cm.
» = 16 040 kilogrammes, V = 765 kilogrammes ; $y_{max} = 0{,}079$ cm.

Ces résultats ont été vérifiés ensuite par des essais qui ont donné

pour câbles de construction semi-close ; y_{max} = 0,18 et 0,25 centimètres
» » close » = 0,17 centimètres
» » spiroïdale » = 0,17 et 0,08 centimètres

Comme on voit ces chiffres coïncident assez bien avec les précédents, mais si l'on effectuait les calculs en admettant E = 2 150 000 les résultats obtenus ne concorderaient plus.

Les essais ont montré clairement que la courbure du câble part du point d'appui de la charge pour diminuer très rapidement de chaque côté. La courbe formée directement au-dessous de la charge a comme rayon :

$$\rho = \frac{1}{\frac{d^2y}{dx^2}} = \frac{E_s \Sigma J}{Q y_{max}} = \frac{2}{V}\sqrt{E_s . \Sigma J . \Sigma P \cos w}. \tag{43}$$

on obtient par exemple pour un câble de construction semi-close avec Q = 12 500 kilogrammes et V = 500 kilogrammes :

$$y_{max} = 0^{cm}.178 \quad \text{et} \quad \rho = 266 \text{ centimètres.}$$

Le moment fléchissant $P y_{max} \cos w$ détermine encore une fatigue à la flexion supplémentaire :

$$\sigma_b = \frac{P \cos w \; y_{max}}{W} = \frac{P \cos w \; y_{max}}{\zeta_3 \, F e}. \tag{44}$$

L'autre force latérale P entraîne la fatigue à la torsion

$$\tau_b = \frac{P \sin w \times y_{max}}{W d} = \frac{P \sin w \, . \, y_{max}}{\zeta_5 \, F e}. \tag{45}$$

En réunissant les égalités 38-45 on obtient la fatigue totale d'un fil :

$$\sigma = \frac{Q}{F}\left[\frac{\cos w}{m}\left(1 + \frac{1}{m\zeta_3} + \frac{y_{max}}{e\,\zeta_3}\right) - \frac{\mu\,(R_a + R_i)}{Q}\left(1 + \frac{e}{nr\zeta_3}\right)\right] - \sigma_s\left(1 - \frac{S}{W}\right)$$

et

$$\tau = \frac{Q}{F}\left[\frac{\sin w}{m}\left(\frac{1}{\zeta_4} + \frac{1}{n\zeta_5} + \frac{y_{max}}{e\zeta_5}\right) - \frac{\mu\,(R_a + R_i)}{Q}\left(\frac{1}{\zeta_4} + \frac{e}{nr\zeta_5}\right)\right] - \tau_s\left(1 - \frac{S'e}{J_p}\right) \tag{46}$$

qui s'ajoutent d'après la formule connue :

$$\sigma_{max} = \frac{1}{2}\left(\sigma + \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}\right). \tag{47}$$

On donne au coefficient de sécurité la valeur généralement admise dans la construction mécanique, c'est-à-dire $\sigma_{max} < 0{,}8\ \sigma_s$. Naturellement la sécurité à la rupture Δ est alors beaucoup plus faible que d'après la méthode ordinaire de calcul.

La fatigue du câble est beaucoup plus grande près des coussinets d'appui des pylônes que sous la pression des roues dans une travée. A ces endroits le câble, généralement courbé vers le haut, fléchit au moment du passage des wagonnets et ces changements de fatigue sont la cause des brisures fréquentes qui se produisent près des pylônes. Les calculs précédents montrent d'ailleurs qu'un petit défaut de la matière souvent imperceptible, amène avec le temps une cassure des fils. Les légères fatigues déterminées par les calculs ordinaires n'expliquent pas ces brisures.

Pour obtenir la fatigue causée par la contre-pression des coussinets d'appui, on peut employer les formules précédemment établies, mais modifiées. Le câble ne peut pas se couder suivant le grand rayon que l'on donne généralement à la courbure des coussinets d'appui, mais la fatigue qui en résulte est naturellement très faible. La méthode de calcul la plus simple avec le ρ des coussinets d'appui consiste à tirer V′ de l'équation (43) donnant la même déformation et de porter ensuite la valeur de V′ ainsi obtenu dans l'égalité (42) relative à y_{max}.

L'exposé précédent permet de calculer un câble dont on connaît par mensuration ou par expérience les valeurs m et n. Pour tous les câbles que l'on trouve dans le commerce il serait très avantageux de connaître le rapport admissible $\frac{V}{Q}$ pour une valeur donnée de V ou de Q. Dans tous les cas les essais précédemment décrits doivent donner pour tous les types de câbles des résultats plus exacts que les simples recherches de l'auteur.

20. Les câbles à torons [1]. — Un câble à torons est formé par un certain nombre de câbles spiroïdaux ayant un angle de pente d'hélice w_1 enroulés avec un angle de pente w_2 autour d'une âme très souvent

---

[1] D'après Bock, Glückauf 1909, page 1545 et suivantes.

en chanvre. Pour simplifier les calculs nous admettrons, sans commettre une erreur appréciable, que la section des torons est pleine ; le câble est alors engendré par une surface circulaire de rayon r_1 qui avance avec une vitesse uniforme suivant une hélice s_2 tout en tournant sur elle-même avec une vitesse angulaire ω_1 afin qu'il ne se produise aucune torsion de fil (fig. 48). Le mouvement de cette surface peut donc être considéré comme une rotation autour de l'axe z avec une vitesse angulaire ω'_2 et un déplacement linéaire de vitesse c_3 dans le sens de ce même axe.

La vitesse $u_1 = r_1\omega_1$ peut se décomposer suivant les deux axes rectangulaires X_1 et Y_1 de la surface circulaire et donner

$$u_1\, x = - r_1\, \omega_1 \sin \varphi$$
$$u_1\, y = - r_1\, \omega_1 \cos \varphi.$$

Comme w_2 est l'angle que forme la tangente à l'hélice avec l'axe du câble on a par rapport aux axes rectangulaires XY qui font avec les précédents un angle ψ :

$$u_x = \quad u_{1x} \cos \psi + u_{1y} \cos w_2 \sin \psi$$
$$u_y = - u_{1x} \sin \psi + u_{1y} \cos w_2 \cos \psi,$$

dans lesquelle son doit remplacer u_{1x} et u_{2y} par leur valeur précédente. Le vecteur de rotation ω_2 peut être transporté de O vers M′, si on ajoute le couple de rotation $r_2\omega_2 = c_2$ perpendiculaire au rayon r_2.

Les vitesses linéaires c_2 suivant les deux axes X et Y sont :

$$c_{2x} = - c_2 \sin \psi = - r_2\, \omega_2 \sin \psi$$
$$c_{2y} = - c_2 \cos \psi = - r_2\, \omega_2 \cos \psi\,;$$

auxquelles viennent s'ajouter, provenant de la vitesse de rotation ω_2,

$$u'_x = - r'\, \omega_2 \sin (\varphi' + \psi)$$
$$u'_y = - r'\, \omega_2 \cos (\varphi' + \psi),$$

ou, en décomposant les fonctions de la somme des angles et en remarquant que :

$$r' = r_1 \sqrt{\cos^2 \varphi + \cos^2 w_2 \,.\, \sin \varphi}$$
$$u'_x = - r_1\, \omega_2 (\sin \varphi \cos \psi \cos w_2 + \cos \varphi \sin \psi)$$
$$u'_y = - r_1\, \omega_2 (\cos \varphi \cos \psi - \sin \varphi \sin \psi \cos w_2).$$

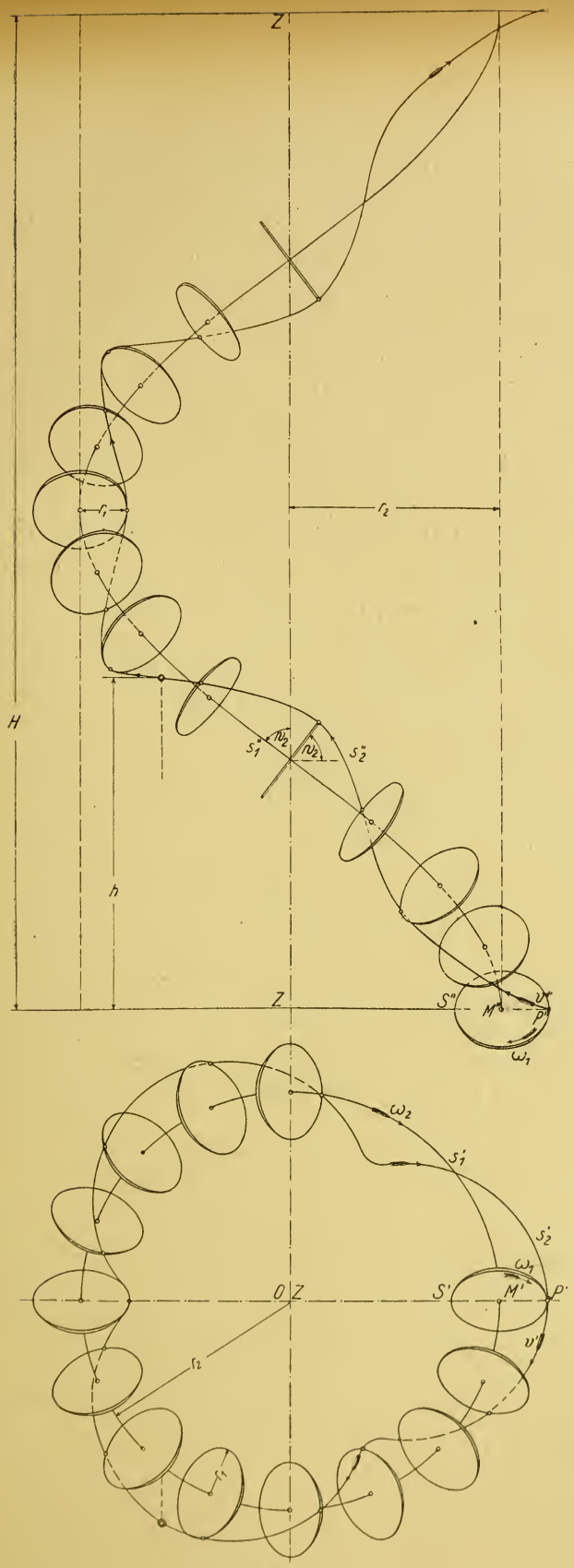


Fig. 48.

La vitesse totale du point P est alors donnée par les relations :

$$v_x = u_x + c_{2x} + u'_x$$
$$v_y = u_y + c_{2y} + u'_y$$
$$v_z = c_3 + u_2$$

dans lesquelles

$$u_z = -r_1\,\omega_1 \cos\varphi \sin w_2$$
$$c_3 = r_2\,\omega_2 \operatorname{cotg.} w_2$$

t étant le temps ; si l'on fait $\varphi = \omega_1\,t$ et $\psi = \omega_2\,t$ on aura :

$$(48)\quad v_x = \frac{dx}{dt} = -r_1\,\omega_1\,(\sin w_1 t\,.\cos w_2 t \pm \cos w_1 t\,.\sin w_2 t\,.\cos w_2)$$
$$- r_2\omega_2 \sin w_2 t \mp r_1\omega_2(\sin w_1 t \cos w_2 t \cos w_2 \pm \cos w_1 t.\sin w_2 t)$$
$$v_y = \frac{dy}{dt} = r_1\,\omega_1\,(\sin w_1\,t \sin w_2\,t \mp \cos w_1\,t \cos w_2\,t \cos w_2)$$
$$- r_2\omega_2 \cos w_2 t - r_1\omega_2(\cos w_1 t \cos w_2 t \mp \sin w_1 t \sin w_2 t \cos w_2)$$
$$v_z = \frac{dz}{dt} = r^2\,\omega_2 \operatorname{cotg} w_2 \mp \omega_1 \cos w_1\,t \sin w_2.$$

Les signes supérieurs s'appliquent aux enroulements dans le même sens et les signes intérieurs aux enroulements croisés.

L'angle γ que fait un élément avec l'axe x est donné par l'égalité suivante :

$$\operatorname{tg}\gamma = \frac{\sqrt{dx^2 + dy^2}}{dz} = \frac{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}}{v_z}$$

ou

$$(49)\quad \operatorname{tg}\gamma = \frac{\sqrt{r_1^2(\omega_2 \cos w_2 \pm \omega_1)^2 \sin^2 \omega_1 t + (r_2\omega_2 + r_1(w_2 \pm \omega_1 \cos w_2) \cos \omega_1 t)^2}}{r_2\,\omega_2 \operatorname{cotg} w_2 \mp r_1\,\omega_1 \cos \omega_1\,t \sin w_2}$$

Pour le point le plus en dehors du toron on tire avec $\omega_1 t = 0$.

$$(49\,a)\qquad \operatorname{tg}\gamma_e = \frac{(r_1 + r_2)\,\frac{\omega_2}{\omega_1} \pm r_1 \cos w_2}{r_2\,\frac{\omega_2}{\omega_1} \operatorname{cotg} w_2 \mp r_1 \sin w_2}$$

et pour le point le plus en dedans avec $\omega_2 t = \pi$

$$(49\,b)\qquad \operatorname{tg}\gamma_i = \frac{(r_2 - r_1)\,\frac{\omega_2}{\omega_1} \mp r_1 \cos w_2}{r^2\,\frac{\omega_2}{\omega_1} \operatorname{cotg} w_2 \pm r_1 \sin w_2}.$$

Le rayon de la courbure principale d'un élément de fil est déterminé par l'égalité :

$$\rho = \frac{\left(\frac{ds}{dt}\right)^2}{\sqrt{\left(\frac{d^2x}{dt^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2y}{dt^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2z}{dt^2}\right)^2 - \left(\frac{d^2s}{dt^2}\right)^2}}$$

$$\rho = \frac{v^3}{\sqrt{B^2 v^2 - A^2}}. \tag{50}$$

Les valeurs de A et de B étant données comme suit :

$$A^2 = \frac{v_2 \left[r_1 \omega_1 \omega_2^2 \sin \omega_1 t + (r_1 + r_2) \sin^2 w \cos \omega_1 t\right]^2}{r_1 \omega_1 + r_2 \omega_2^2 \pm 2 t_1^2 \omega_1 \omega_2 \cos w_2 + 2 r_1 r_2 \omega_2^2 \cos \omega_1 t + r_1^2 \omega_2^2 (\cos^2 w_2 \sin^2 \omega_1 t + \cos^2 \omega_1 t) + r_2^2 \omega_2^2 \operatorname{cotg}^2 w_2}$$

$$B^2 = r_1 \omega_1^4 + r_2^2 \omega_2^4 \pm 4 r_1^2 \omega_1 \omega_2 (\omega_1^2 + \omega_2^2) \cos w_2 + 2 r_1^2 \omega_1^2 \omega_2^2 (1 + \cos^2 w_2 + r_1^2 \omega_2^4 (\cos^2 \omega_1 t + \cos^2 w_2 \sin^2 \omega_1 t) + 2 r_1^2 \omega_1^2 \omega_2^2) (\sin^2 \omega_1 t + \cos^2 w_2 \cos^2 \omega_1 t) + 2 r_1 r_2 \omega_2^2 (\omega_1^2 \pm 2 \omega_1 \omega_2 \cos w_2 + \omega_2^2) \cos \omega_1 t.$$

Comme il est démontré plus loin la courbure de rayon maximum et celle de rayon minimum se trouvent respectivement à l'extérieur et à l'intérieur. On a pour ces deux cas :

$$\rho_e = \frac{r_1^2 \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 + (r_1 + r_2)^2 \pm 2 \frac{\omega_1}{\omega_2} r_1^2 \cos w_2 + r_2^2 \operatorname{cotg}^2 w_2}{\left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 r_1 + r_1 + r_2 \pm 2 \frac{\omega_1}{\omega_2} r_1 \cos w_2}, \tag{50 a}$$

$$\rho_i = \frac{r_1^2 \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 + (r_2 - r_1)^2 \pm 2 \frac{\omega_1}{\omega_2} r_1^2 \cos w_2 + r_2^2 \operatorname{cotg}^2 w_2}{\left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 r_1 - (r_2 - r_1) \pm 2 \frac{\omega_1}{\omega_2} r_1 \cos w_2}. \tag{50 b}$$

Outre le rapport $\frac{\omega_1}{\omega_2}$, les égalités ci-dessus ne contiennent que des valeurs qui peuvent être facilement mesurées sur le câble. Dans un enroulement du toron autour de l'âme sur une longueur H (fig. 48) égale au pas de l'hélice de la première disposition, la section du toron tourne plusieurs fois de 360° autour de son axe ; nous désignerons par h le pas de l'hélice de la deuxième disposition dans laquelle la section n'effectue qu'une rotation sur la longueur h. Si nous représentons par T_1 et T_2 les temps nécessaires à un enroulement complet nous aurons :

$$\omega_1 T_1 = w_2 T_2 = 2\pi$$

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{T_2}{T_1}.$$

En intégrant l'égalité (48, c) pour $v_z = \frac{dz}{dt}$ on aura :

$$z = \frac{r_2\omega_2 t}{\operatorname{tg} w_2} \mp r_1 \sin w_2 \sin \omega_1 t.$$

ou avec le temps T

$$h = r_2\omega_2 T_1 \operatorname{cotg} w_2$$

car $\sin \omega_1 T = 0$.

De plus

$$H = c_3 \,.\, T_2 = r_2\omega_2 T_2 \operatorname{cotg} w_2$$

en divisant ces deux égalités l'une par l'autre on obtient le rapport cherché

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{H}{h}. \tag{51}$$

Le tableau suivant donne les caractéristiques principales de deux câbles formés chacun par 6 torons de 6 fils de 2 millimètres de diamètre ; l'un d'eux est à enroulements dans le même sens et l'autre à enroulements croisés. Les valeurs obtenues par le calcul et par la mensuration n'avaient qu'une différence maximum de 3 %.

Caractéristiques	Enroulements « Albert »	Enroulements croisés
Diamètre du fil δ	2,00 mm.	2,00 mm.
Diamètre du toron d_1	6,24 »	6,30 »
Diamètre du câble d_2	18,64 »	18,78 »
Pas de l'hélice du toron H	143,3 »	152,0 »
Pas de l'hélice du fil h	121,3 »	53,33 »
$r_2 = \frac{1}{2}(d_2 - d_1)$	6,20 »	6,24 »
$r_1 = \frac{1}{2}(d_1 - \delta)$	2,12 »	2,15 »
$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{H}{h}$	1,182	2,85
w_z	15°,13′	14°,28′
tg γ_e	0,485	0,0977
tg γ_i	0,0708	0,492
Angle γ_e	25°,53′	5°,35′
Angle γ_i	4°,3′	23°,52′
Rayon de courbure ρ_e	37,6 mm.	47,5 mm.
Rayon de courbure ρ_i	148,8 »	407,5 »
w_1	11°,5′	9°,3′

Si l'on porte les valeurs précédentes dans l'égalité (49), pour différentes grandeurs de l'angle γ on obtient toujours des nombres compris entre les quantités données pour γ_e et γ_i. En général on trouve des éléments qui ne peuvent être parallèles à l'axe du câble que si $\cos w_2 = \frac{r_2 - r_1}{\frac{\omega_1}{\omega_2} r_1}$, ce qui ne se présente jamais dans les constructions ordinaires.

On remarque dans le tableau que les valeurs de γ et de ρ des deux espèces de câble sont renversées. La valeur minimum de ρ donne de suite l'allongement maximum au moment de la construction : $\varepsilon_{max} = \frac{\delta}{2\rho_{min}}$; ce qui a été dit précédemment est également valable pour cette quantité. Si on a dans un câble un effort de tension Q, la force qui s'exerce sur chaque fil d'une section se décompose suivant une direction faisant un angle γ avec l'axe et une deuxième direction perpendiculaire à la première, de telle sorte que la fatigue totale peut se calculer de la même manière que dans le cas d'un câble spiroïdal. Lorsque chaque toron se compose de plusieurs couches de fils, on doit tout d'abord rechercher quelle est la portion de la charge Q qui intervient dans chaque couche.

Les câbles doivent encore supporter une fatigue assez considérable déterminée par les poulies des stations et les poulies-guide. Pour le calcul de la flexion, à chaque point P de la section correspond un rayon R′ et non le rayon R de la poulie (fig. 49).

On peut maintenant considérer l'élément de fil faisant avec l'axe rectiligne du câble un angle γ comme une partie d'hélice ayant un rayon de R_1 donné par l'égalite $\rho_1 = \frac{R_1}{\cos^2 \gamma}$. Lorsque l'élément a été courbé avec le rayon R′ il se trouve modifié de telle sorte qu'il peut être considéré comme une portion de l'hélice engendrée par un cylindre de rayon R_1 enroulé sur un cylindre de rayon R_2 et dont le rayon de courbure est $\rho_2 = \frac{R_2}{\cos^2 \gamma}$. Entre ces différents rayons on a la relation :

$$\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} = \frac{1}{R'};$$

en remplaçant R_2 et R_1 par leur valeur on obtient :

$$\frac{1}{\cos^2 \gamma}\left(\frac{1}{\rho_2} - \frac{1}{\rho_1}\right) = \frac{1}{R'}$$

d'où

$$\frac{1}{\rho_2} = \frac{\cos^2 \gamma}{R'} + \frac{1}{\rho_1}. \tag{52}$$

R′ doit être considéré comme négatif si la courbure ainsi déterminée est de sens contraire à celle donnée à l'élément de fil au moment de la construction du câble.

Dans le cas des deux câbles considérés précédemment, pour les points représentés dans la figure 49 dont les valeurs de γ et ρ_1 sont déjà con-

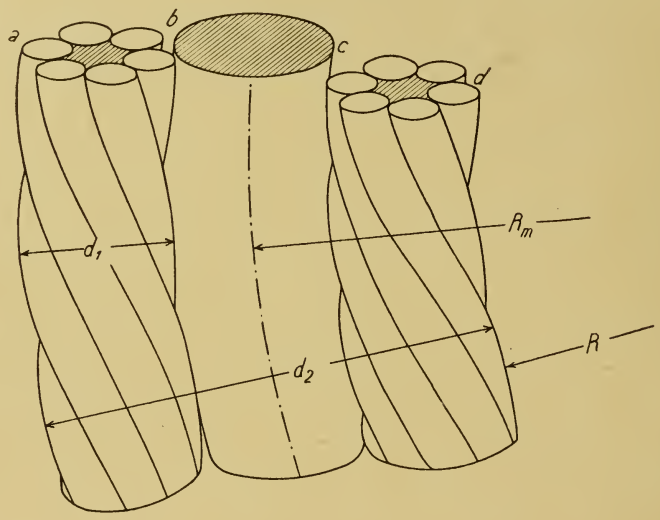


Fig. 49.

nues, on obtient les valeurs du rayon de courbure ρ_2 suivantes, lorsque le câble passe sur une poulie de 990 et 490 millimètres de rayon.

Les nombres supérieurs se rapportent aux câbles passant sur la poulie de grand diamètre et les nombres inférieurs au cas de la poulie de petit diamètre. Le tableau montre qu'avec une poulie de même diamètre les déformations de courbures sont beaucoup plus importantes dans le cas d'un câble à enroulements croisés qu'avec des enroulements « Albert » en sens unique. Par contre, dans ce dernier type de câble, les courbures des fils extérieurs sont plus grandes que dans un câble à enroulements croisés. On doit encore remarquer que la fatigue d'un câble

à torons change de sens (loi de Poisson), car un même fil peut prendre des courbures inverses sur deux rouleaux consécutifs.

Mode d'enroulement du câble	Point	ρ_1 mm.	R' mm.	ρ_2 mm.
Enroulement Albert	*a*	38,7	1 007,6 507,0	37,6 36,4
	b	148,8	1 001,4 501,4	174,0 214,0
	c		995,2 495,2	129,5 114,6
	d	38,7	991,0 491,0	40,0 41,4
Enroulement croisé	*a*	47,4	1 007,8 507,8	45,3 43,5
	b	407,5	1 001,4 501,4	618,0 1 282,0
	c		995,3 495,3	304,0 242,0
	d	47,4	991,0 491,0	49,8 52,4

Pour le reste, on peut admettre les théories déjà exposées au sujet des câbles spiroïdaux. Les torons peuvent être considérés comme des câbles spiroïdaux dans lesquels chaque fil supporte une certaine fatigue comme le montre la figure 46, de telle sorte qu'on se trouve avoir des efforts de compression même dans les fibres les plus éloignées de l'âme. Aux fatigues initiales du câble, on doit ajouter celles qui sont causées par sa flexion sur les poulies, comme dans le cas des câbles spiroïdaux. Par suite des variations de sens des fatigues, la tension maximum doit être encore très loin de la limite d'élasticité et même avec un coefficient de sécurité assez faible il faut rester dans les limites demandées par la loi de Poisson.

Lorsque la matière des fils est très dure, la courbe des allongements prend une forme se rapprochant de celle représentée par la figure 50 ; le calcul est d'autant plus modifié que la partie la plus extérieure de la surface de tension s'éloigne davantage du rectangle. Lorsque cette surface est trapèzoïdale on obtient cependant un calcul simple et suffisamment exact des tensions terminales dans le fil non chargé.

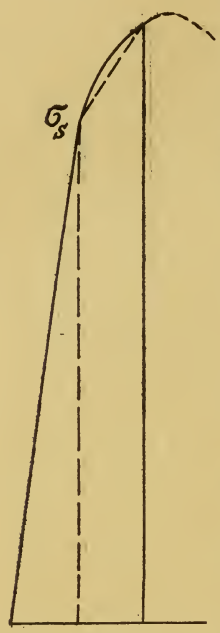


Fig. 50.

La méthode de calcul généralement employée ne considère que les tensions déterminées par la charge du câble, de sorte qu'elle est aussi peu exacte que la vieille règle, cette charge ne devant faire que du $\frac{1}{8}$ au $\frac{1}{10}$ de la résistance à la rupture.

La théorie précédente et celle relative aux câbles spiroïdaux ne doivent être appliquées que dans les cas discutables, car leurs calculs offrent trop de difficultés pour les cas ordinaires, et les données de construction nécessaires font le plus souvent défaut. Ces calculs sont plutôt utiles aux fabriques de câbles qui manquent la plupart du temps de données exactes sur les efforts de traction et de flexion auxquels sont soumis les câbles des transporteurs.

B. — MONOCABLES

I. — Transporteurs Système Hodgson.

21. Accouplement des wagonnets au câble. — Dans les monocâbles tels qu'ils ont été réalisés par Hodgson, les wagonnets sont supportés par le câble qui sert à les déplacer. On pose sur celui-ci une selle à laquelle est suspendue, au moyen d'un pendant en fer forgé, une benne ou autre récipient approprié, destiné à contenir la matière à transporter (fig. 53). Afin que le wagonnet ne détériore pas les appuis du câble en prenant une position oblique par rapport a ce dernier, sous l'influence du vent ou dans les pentes, la caisse est d'habitude suspendue librement à la partie inférieure du pendant. Pour plus de sûreté encore cette suspension est elle-même articulée au-dessous de la selle. Ce n'est qu'exceptionnellement qu'on n'emploie pas cette double articulation du wagonnet, par exemple dans le cas de la figure 51, lorsque les charges sont très lourdes et font craindre qu'il se produise un trop fort mouvement pendulaire dû à l'action du vent ou à toute autre cause. Il est également nécessaire pour la sécurité du passage sur les galets porteurs des câbles, que les selles ne soient pas inclinées sous l'effet de leur charge.

Comme ce sabot en forme de pince n'est entraîné par le câble que sous l'action de son adhérence, cette partie doit être constituée par un corps dont le coefficient de frottement sur la face graissée du câble soit aussi élevé que possible. Pour cela on a pourvu tout d'abord la fourche d'une semelle en bois qui offrait l'avantage de pouvoir être facilement re-

nouvelée et en n'importe quel endroit ; actuellement on emploie presque exclusivement des garnitures en caoutchouc, surtout pour de fortes rampes. Dans ce cas, on ne peut guère adopter un coefficient de valeur supérieure à $\mu = \frac{1}{6}$ sur un câble bien graissé, car il faut laisser une certaine marge de sécurité pour parer aux éventualités diverses, tels que

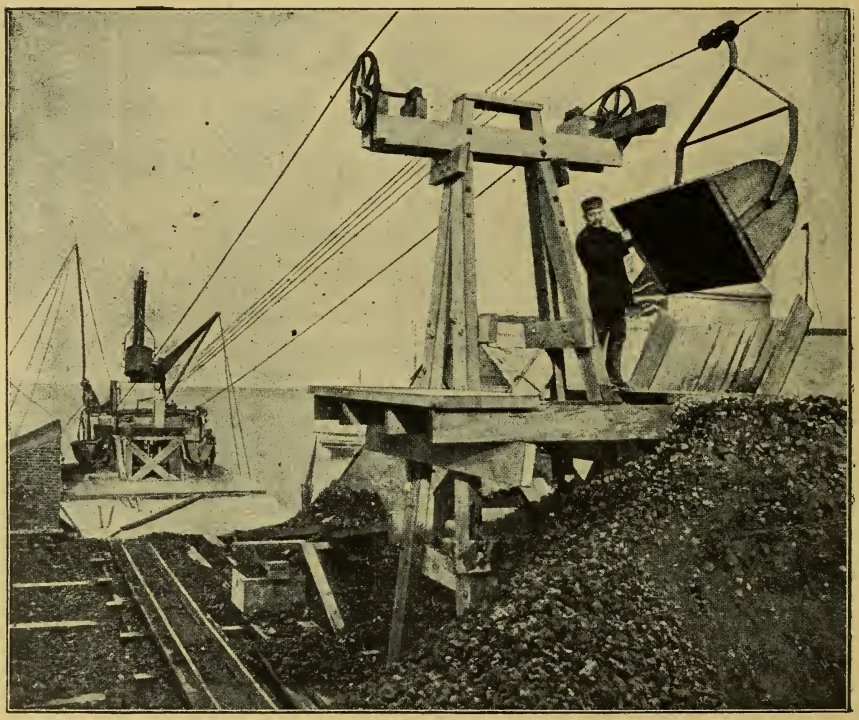


Fig. 51.

les chocs se produisant au passage de chaque rouleau porteur et causant un desserrage de l'accrochage et par suite une diminution de frottement.

Une adhérence relativement faible de la suspension sur le câble peut être parfois désirable comme dans l'exemple de la figure 51 représentant un transporteur construit par MM. Bullivant et C°, Londres. Cet appareil sert au transport du coke des bords de la Tamise à une fabrique de ciment.

Sur chaque pylône se trouve une plate-forme de déchargement d'où les bennes sont basculées et remises à la main dans leur position nor-

male; bien que la vitesse du câble soit faible, $0^{m},50$ à la seconde, il est certain que le peu d'adhérence de la fourche sur le câble facilite beaucoup ce travail. L'usure de la garniture est naturellement proportionnelle à sa fatigue.

Dans les stations, des petits galets disposés sur le côté du sabot viennent s'engager sur des rails dont l'extrémité arrive à une distance bien déterminée du câble; de cette façon les bennes peuvent être facilement poussées à bras plus loin. Dans les appareils les plus récents l'axe du galet est légèrement incliné, de sorte que le centre de gravité du wagonnet se trouve dans le plan vertical des points d'appuis. On empêche ainsi la charge d'osciller lorsqu'elle passe du câble sur le rail. Afin que ce passage soit aussi doux que possible, le rail se termine par une partie inclinée.

22. Fatigue et diamètre du câble. — Bien que dans le calcul des installations il soit tenu compte des difficultés exposées précédemment, il arrive cependant assez souvent que le sabot glisse. Il en résulte au bout d'un certain temps de service une usure très sensible

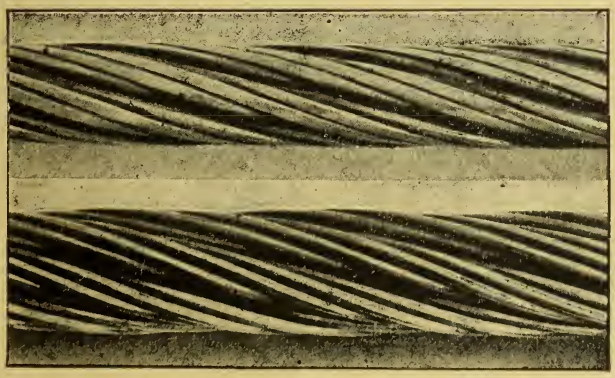


Fig. 52.

de la partie extérieure du câble que montre la juxtaposition d'un câble neuf et d'un câble usé (fig. 52). Le câble fourni par la maison Bullivant et C° avait été en service constant pendant deux ans et avait transporté dans ce laps de temps 165 000 tonnes de minerai de fer par charges de 300 kilogrammes. Sa charge de rupture de 29 050 kilogrammes à l'état

neuf était descendue à 27 500 kilogrammes. La section n'était cependant réduite que de 5,3 %, de sorte que malgré l'usure importante de l'extérieur du câble, celui-ci aurait pu encore résister un certain temps.

La figure permet de constater une autre particularité commune à tous les câbles à torons : ils s'allongent à l'usage comme les organes travaillant à la traction, de sorte qu'il est en général nécessaire de les raccourcir plusieurs fois avant leur remplacement. Par suite de cet allongement, l'angle de pente de l'hélice s'agrandit légèrement et le diamètre du câble subit au contraire une diminution sensible, les fils intérieurs s'imprimant de plus en plus dans l'âme en chanvre.

Afin d'empêcher le câble, qui supporte seul tout le poids de la charge, de prendre entre deux pylônes une trop grande flèche, on le tend très fortement. En considération de la fatigue à la flexion au passage des poulies de renvoi et des rouleaux porteurs, on ne doit guère descendre au-dessous de 7 comme coefficient de sécurité ; ceci conduit à une section de câble assez grande pour résister aux efforts de tension inévitables.

D'après l'équation, page 30, la flèche totale d'un câble pesant q kilogrammes par mètre entre deux appuis éloignés d'une distance a en mètres, et supportant en son milieu une charge unique $P + p$ kilogrammes, est :

$$f = \frac{a}{4H}\left[\frac{1}{2}qa + (P + p)\right].$$

Avec la condition :

$$q \text{ kilogrammes} \backsim 0{,}95\,F \text{ (F étant exprimé en cmq)}$$

valable pour les câbles à torons et :

$$H \backsim F\,\frac{K_z}{\Delta},$$

condition toujours remplie d'une façon suffisamment exacte dans les installations du système en question, l'équation devient :

$$\frac{f}{a} = \frac{\Delta}{4K_z}\left(0{,}475\,a + \frac{P + p}{F}\right).$$

Si on admet que pour différentes valeurs du poids de la charge $P + p$

et pour le même effort de traction $\frac{K_z}{\Delta}$, le rapport $\frac{f}{a}$ doive conserver la même valeur, on aura :

$$\frac{P_1 + p_1}{F_1} = \frac{P_z + p_z}{F_z}$$

pour une valeur constante de a exprimant la distance entre les appuis. Ceci montre que la section du câble doit être proportionnelle à la charge totale.

Pour des câbles dont la charge de rupture : $K_z = 1\,400$ kilogrammes par centimètre carré, on choisit généralement :

$$\frac{P + p}{F} \backsim 200 \text{ kilogrammes par centimètre carré,}$$

ce qui permet de trouver immédiatement la section du câble à l'aide du barême donné dans le chapitre 10.

Dans le cas assez commun de faibles charges on emploie des câbles moins résistants ($K_z = 12\,000$ kilogrammes par centimètre carré) parce que, pour une même résistance à l'allongement, les différents fils sont plus gros et peuvent supporter une plus grande usure déterminée par les glissements impossibles à éviter. On applique dans ce cas la formule :

$$\frac{P + p}{F} \backsim 200 \,.\, \frac{12\,000}{14\,000} \text{ kilogrammes par centimètre carré.}$$

Lorsque les charges unitaires sont relativement importantes, pour conserver au câble une souplesse suffisante il faut prendre un acier ayant une plus forte résistance à la traction et donner au nombre 200 une augmentation correspondante.

Ce calcul n'est pas absolument exact car on y néglige le membre $0{,}475\,a$ de la parenthèse de l'équation fondamentale; il donne cependant de bons résultats qui ont été éprouvés par la pratique et qui suffisent si l'on considère comme normale l'usure représentée par la figure 52.

23. Pylônes sur le parcours. — Les câbles sont supportés par des galets montés fous et en porte-à-faux sur les pylônes. Ces galets ou poulies ont généralement un diamètre d'environ 600 millimètres afin

de ne pas trop fatiguer le câble à la flexion, quoique sa raideur s'oppose à ce qu'il épouse par trop la forme de la jante (voir fig. 51). Le câble

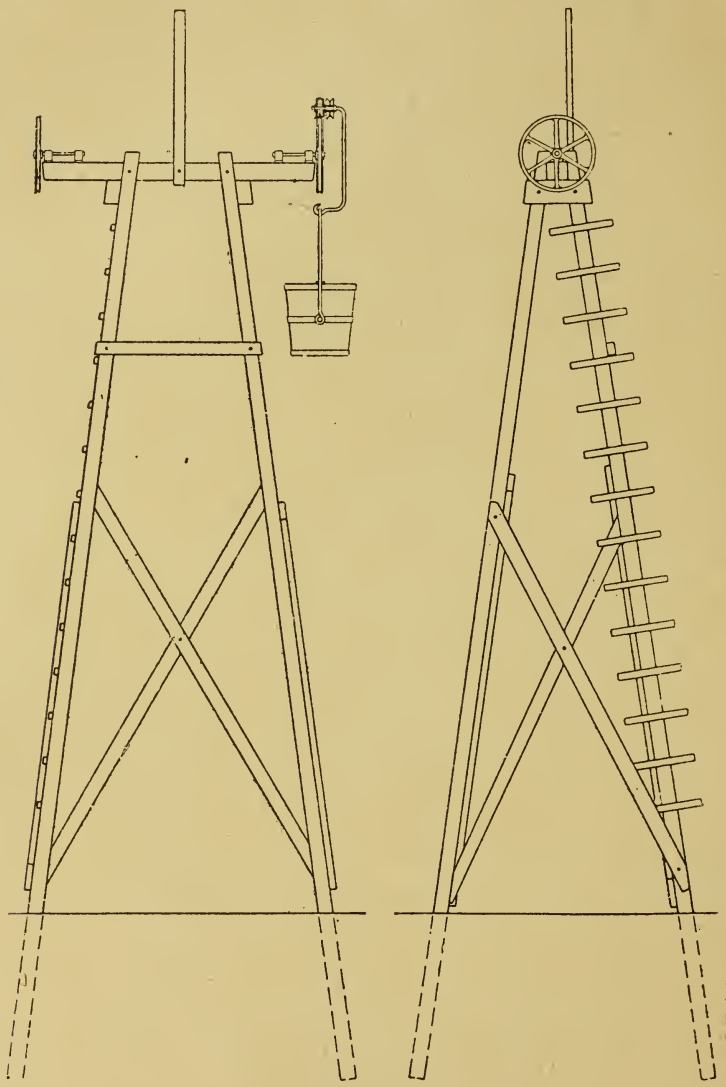


Fig. 53.

qui est en acier excessivement dur use fortement les couronnes des roues en fonte, aussi munit-on celles-ci dans la plupart des cas d'une couronne en fer forgé facilement renouvelable.

Les pylônes sont généralement construits en bois, excepté dans les régions tropicales où ces supports seraient trop rapidement détruits. La figure 53 représente un type de pylône souvent employé par la maison Bullivant et C°. Il est formé par quatre poteaux ronds enfouis dans le sol et reliés par des diagonales ; une traverse placée à la partie supérieure supporte les paliers des rouleaux porteurs.

La photographie reproduite par la figure 51 montre un pylône analogue.

La distance des deux galets porteurs varie généralement de $1^m,800$ à $2^m,500$, et elle est en moyenne de 2 mètres. On ne dépasse $2^m,500$ que lorsque l'installation a un but tout à fait spécial à remplir, tel que la répartition de la matière transportée sur une grande surface.

24. Tracé de la ligne. — La plus grande pente que peut avoir en toute sécurité un transporteur monocâble de ce système est donnée par la condition relative à l'accouplement $\operatorname{tg} \gamma < \mu$ dans laquelle $\mu \sim \frac{1}{6}$.

Dans les installations ordinaires l'angle γ est très peu modifié par la courbure du câble sous l'action de son propre poids et de celui des wagonnets, de sorte que lorsque le climat n'est pas trop défavorable on peut prendre comme inclinaison maximum de ligne $\frac{1}{7}$. Dans les contrées du Nord où le câble est souvent recouvert de givre, la pente maximum des transporteurs doit être considérablement plus faible que dans les pays à climat tempéré. Cette raison est cause que les transporteurs de ce système sont beaucoup plus nombreux dans les régions du Sud que dans celles du Nord.

Nous supposerons qu'en général l'écartement des pylônes ne dépasse pas la distance moyenne entre les wagonnets, ce que nous avons d'ailleurs déjà admis pour la détermination du diamètre du câble. On est ainsi le plus souvent conduit à une portée moyenne de 50 à 70 mètres ; selon le profil du terrain on peut cependant aller jusqu'à 100 mètres et au-dessus. Lorsque l'établissement des pylônes présente certaines difficultés, on peut prendre 100 mètres comme écartement moyen, mais dans ce cas on doit naturellement tenir compte de la grande

fatigue inévitable du câble au passage des galets porteurs. La portée de 180 mètres peut être considérée comme un maximum et possible seule-

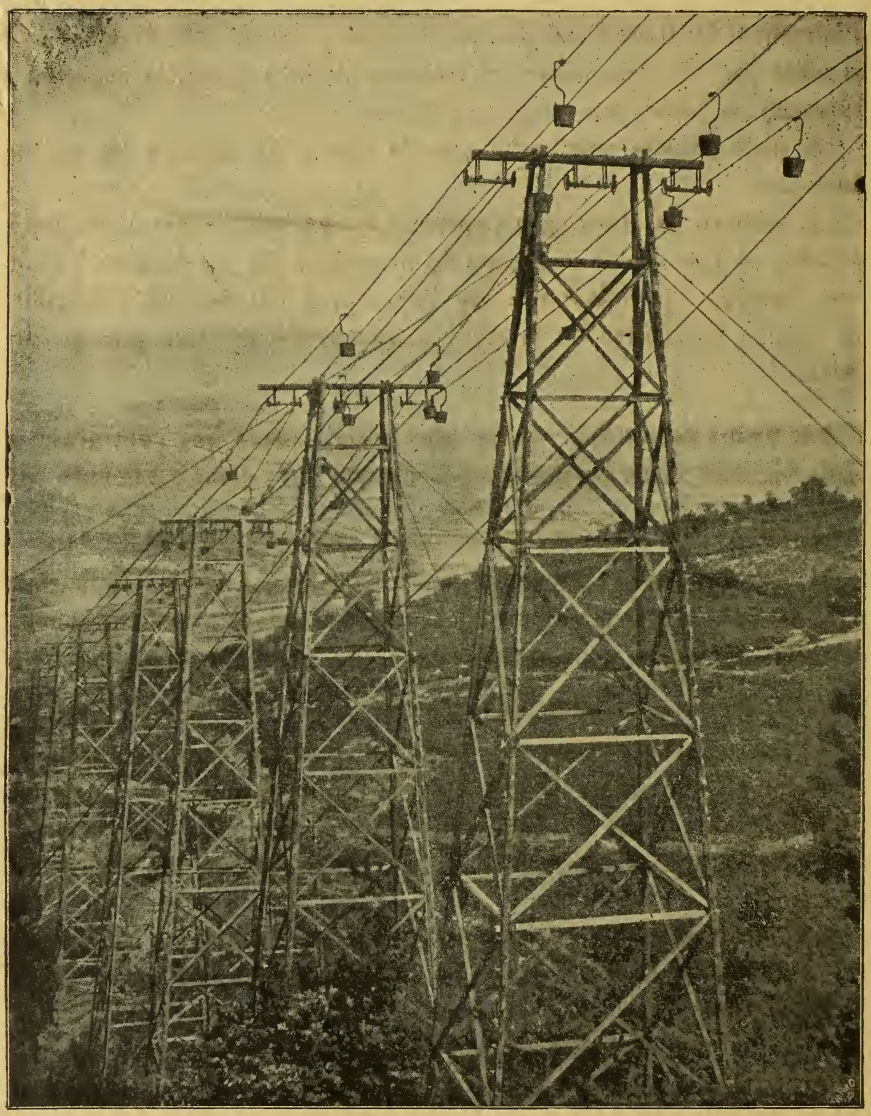


Fig. 54.

ment dans le cas de chemins aériens peu inclinés. La courbure que prend

alors le câble en charge est tellement grande que les wagonnets glissent facilement près des pylônes. Le câble repose dans ce cas par un arc assez grand sur les poulies, d'où il résulte une fatigue à la flexion considérable.

Comme on voit le système Hodgson est surtout avantageux pour un faible débit, car lorsque le terrain est accidenté il est impossible d'établir la ligne avec des pylônes de hauteur normale. Il faut alors construire les voies avec de grands pylônes comme le montre la figure 54 ; celle-ci permet encore de constater que les points d'appui de tous les pylônes sont en ligne droite. Si l'on joignait les deux points A et B par une para-

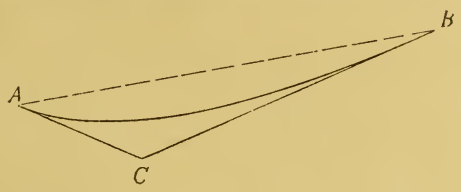


Fig. 55.

bole (fig. 55) on obtiendrait des pylônes beaucoup plus hauts qu'en suivant le tracé ACB avec une station d'inflexion verticale en C. La figure 56 représente le schéma d'une station de ce genre. A l'entrée et à

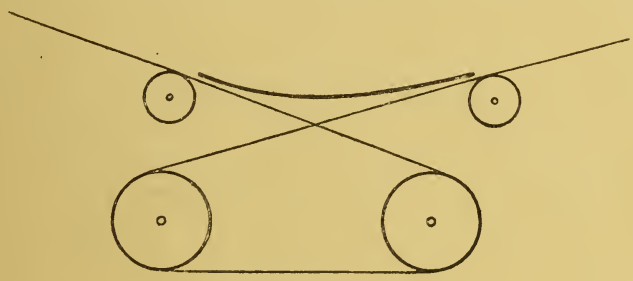


Fig. 56.

la sortie le câble passe sur un galet porteur ordinaire pour se diriger ensuite vers le bas où il contourne deux poulies de renvoi. Dans la station les vagonnets roulent à l'aide de leurs roues sur un rail placé près du câble.

Aux points d'inflexion de sens contraire, aux sommets des surélé-

vations de terrain, on dispose deux galets à environ 2 mètres, $2^m,50$ l'un de l'autre afin d'éviter un coude trop prononcé du câble.

Les stations d'angle avec déviation horizontale du câble sont exécutées d'une façon analogue, soit avec une poulie de 2 mètres de diamètre, soit avec 2 ou 3 poulies de diamètre plus petit ; les wagonnets sont poussés à la main sur un rail latéral depuis l'entrée jusqu'à la sortie de la station.

25. Stations terminales. — La disposition la plus simple des stations terminales est fournie lorsque la commande s'effectue dans la station

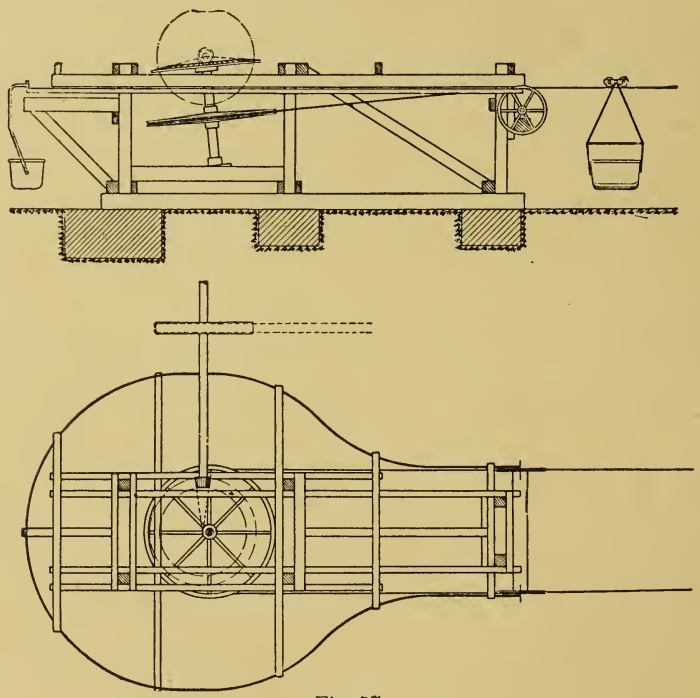


Fig. 57.

supérieure pendant que dans l'autre la poulie est maintenue par un contrepoids ou un palan qui permet de donner au câble la tension voulue. Généralement la commande se fait par l'intermédiaire d'un train d'engrenages côniques et d'une transmission.

La figure 57 représente une station motrice de ce genre d'après le

« Ropeways Syndicate » à Londres. Les wagonnets sont poussés sur des rails dans la station et chargés soit à la main, soit par l'intermédiaire de trémies. La plupart des maisons anglaises emploient comme rails des fers plats de 150 à 180 millimètres de largeur et 10 à 13 millimètres d'épaisseur. Ces fers sont arrondis à leur partie supérieure et fixés aux poutres de la station au moyen de petites équerres ou de supports en fonte.

Afin d'avoir tout le mécanisme sous la surveillance d'un même conducteur, on dispose très souvent la commande et le tendeur dans la même station. La poulie à câble de l'autre station tourne alors dans des paliers fixes. La figure 58 représente le croquis d'une disposition exécutée par

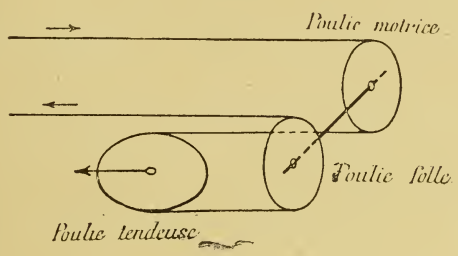


Fig. 58.

Bullivant et C°. Le câble en arrivant dans la station passe sur la poulie motrice disposée verticalement, de là sur la poulie tendeuse presque horizontale qui se déplace sur une légère pente, pour sortir ensuite après avoir contourné une poulie folle montée sur l'axe de la poulie motrice. La poulie tendeuse est tirée par un palan ; cette disposition a l'inconvénient de ne pas tendre automatiquement le câble. Comme les pylônes sont près l'un de l'autre et que les charges ont peu d'influence sur la flèche du câble, il n'est pas important que le dispositif tendeur soit automatique.

La figure 59 montre la station motrice d'un transporteur monocâble construit par Bullivant et C° pour la Tharsis Sulphur and Copper C° Ltd à Huelva en Espagne. Ce chemin aérien a une longueur de 3 340 mètres ; il transporte 20 tonnes par heure de minerai de cuivre, de la mine à la station établie près du chemin de fer (fig. 60) et 10 tonnes de charbon en sens inverse.

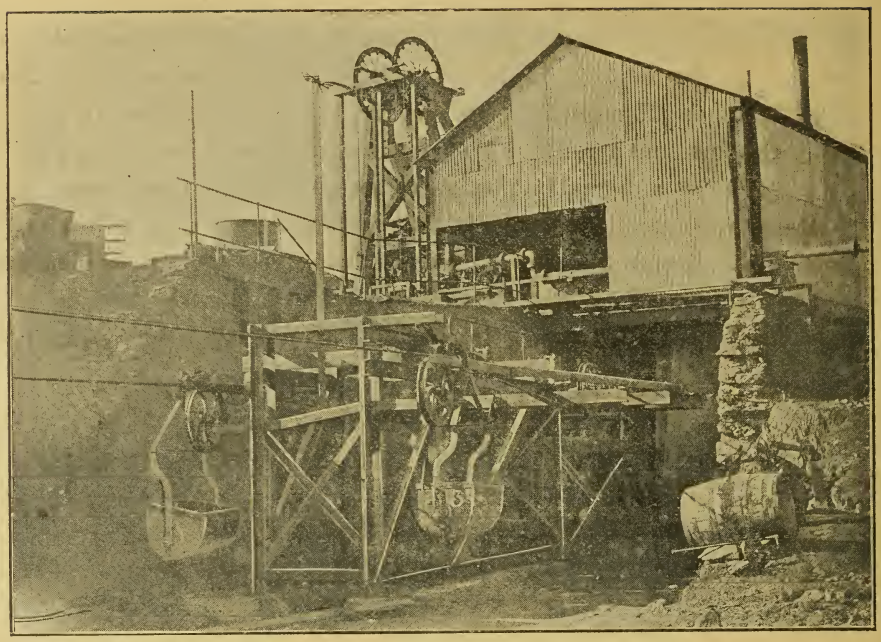


Fig. 59.

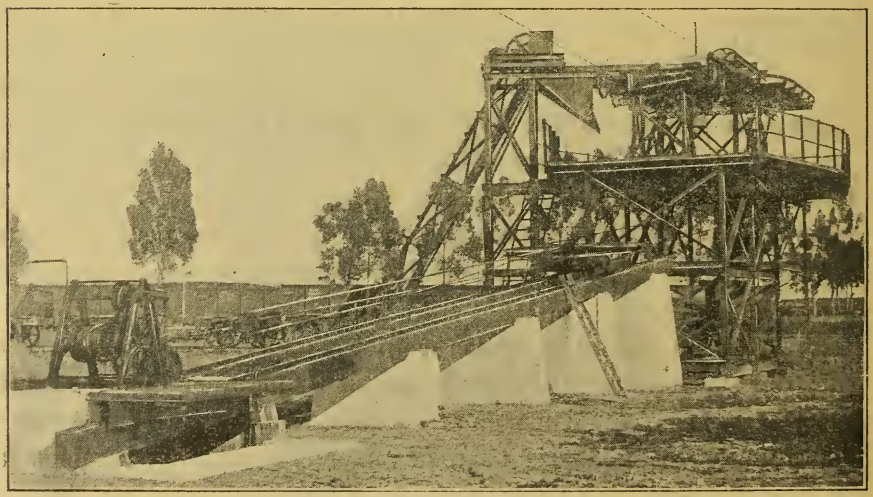


Fig. 60.

Le minerai est culbuté dans une trémie avec deux goulottes desservant deux voies ferrées différentes. Le charbon est amené dans les wagonnets aériens placés sur une voie suspendue de chargement au moyen d'un élévateur à godets. Cet élévateur que l'on distingue dans la figure 60 est mis en mouvement par la commande même du chemin aérien au moyen d'un embrayage à friction qui permet de rendre solidaires ou indépendants les mouvements des deux transporteurs. Le charbon arrive à la partie supérieure de la station dans une petite trémie, et le levier de la porte de cette dernière est combiné avec la fourche de commande de l'embrayage.

Les wagonnets, d'une contenance de 350 kilogrammes, sont à une distance l'un de l'autre d'environ 125 mètres, de sorte qu'on doit transporter 58 charges par heure pour atteindre le débit demandé.

26. Vitesse du câble et débit. — La vitesse du câble convoyeur varie beaucoup avec les conditions de l'installation. On peut considérer que la vitesse maximum, dans le cas de faibles charges inférieures à 100 kilogrammes et de grandes portées, est $v = 4$ mètres à la seconde. Avec des conditions normales, on prend généralement $v = 1^m,80$ à 2 mètres à la seconde, et dans le cas de la figure 51, par exemple, où les wagonnets doivent être culbutés en marche, on fait $v = 0^m,50$.

Lorsqu'on a des wagonnets d'environ 55 kilogrammes de poids propre, on ne dépasse généralement pas 150 kilogrammes comme poids de la charge ; les constructeurs anglais et américains vont jusqu'à 300 kilogrammes et même 400 dans les installations provisoires. Dans ces conditions ils ne prennent toutefois que $1^m,25$ comme vitesse de transport.

La distance qui sépare les wagonnets dépend naturellement du débit de l'installation ; on admet généralement comme intervalle minimum entre deux wagonnets consécutifs 20 secondes. Le plus souvent ils ne se suivent pas d'aussi près et on peut considérer l'intervalle ordinaire égal à 30 secondes.

Les wagonnets ayant une charge utile de 120 kilogrammes et se suivant à des intervalles de 30 secondes avec une vitesse de 2 mètres à la seconde, le débit horaire est de :

$$Q = \frac{120}{1.000} \times \frac{60}{30} \times 60 \backsim 14,5 \text{ tonnes.}$$

Avec des wagonnets de 300 kilogrammes de contenance, des intervalles de 20 secondes et une vitesse de $1^m,25$ à la seconde le débit sera de :

$$Q = \frac{300}{1.000} \times \frac{60}{20} \times 60 = 54 \text{ tonnes à l'heure.}$$

Le premier débit peut être considéré comme normal et le second comme maximum.

C'est seulement depuis quelques années qu'on a atteint ce grand débit ; autrefois on disposait deux et même trois chemins aériens l'un près de l'autre comme le montre la figure 54. Des installations de ce dernier genre existent dans les mines de fer du nord de l'Espagne, et on a été conduit à la construction de plusieurs d'entre elles de la façon suivante : au début de l'exploitation de la mine on a construit un transporteur de faible débit ; plus tard l'exploitation ayant augmenté on a dû établir un deuxième chemin aérien et enfin un troisième. Les frais d'installation et la force motrice sont naturellement dans ce cas beaucoup plus élevés que si on avait installé tout d'abord un transporteur unique dont le débit aurait été égal à ceux des trois réunis.

Par suite de l'augmentation toujours croissante des matières, on est arrivé, aux environs de Bilbao, à construire trois groupes de trois monocâbles chacun, dont le débit total est de 2 500 tonnes par jour.

27. Tension du câble et commande. — L'équation générale (23) du chapitre 17 nous donne à chaque instant la tension du câble, si l'on considère que la charge repose également sur les galets porteurs et qu'alors $\mu = \mu_r$. La tension maximum d'un câble étant donnée par le coefficient de sécurité admis, les contrepoids sont également déterminés par cette équation. Dans les installations avec station d'inflexion dans le sens vertical suivant le schéma de la figure 56, on doit calculer tout spécialement l'influence des poulies de déviation. Avec la faible pente de la ligne on n'a presque jamais de passage brusque de surélévations de terrain,

la formule fondamentale peut alors être simplifiée et ramenée à la suivante :

$$(53) \qquad S_1 = S\left(1 \pm \frac{4\xi z}{D}\right) + Q\left[\frac{q}{Q} + \frac{0,278}{v}\left(1 + \frac{p}{P}\right)\right](h \pm \mu_r l)$$

pour le cas général où le transport ne s'effectue que dans un sens.

Les galets porteurs sont généralement montés fous, et les pressions de l'axe dans les constructions ordinaires sont alors égales à environ 1,6 de la pression sur les galets. Le diamètre de l'axe étant d_1 la résistance rapportée à la jante de la poulie de diamètre D est :

$$(54) \qquad \mu_r = 1,6\,\mu_1 \frac{d_1}{D},$$

dans laquelle égalité μ_1 est le coefficient de frottement de l'axe, que l'on prend de 0,07 pour les graissages ordinaires. Dans la plupart des installations on a environ : $D = 0^m,600$ et $d_1 = 0^m,045$, d'où :

$$(54\,a) \qquad \mu_r = 1,6 \times 0,07\,\frac{0,045}{0,6} \backsim \frac{8,5}{1\,000}.$$

En outre pour les transporteurs de ce système on peut poser :

$$\xi \backsim 0,012\,d.$$

La force motrice nécessaire est donnée par l'équation correspondante simplifiée du chapitre 18 :

$$(55) \qquad N = \frac{Qh}{270} + \frac{Sv}{37,5} \times \frac{4\xi z}{D} + \left[\frac{qv}{37,5} + \frac{Q}{270}\left(1 + \frac{2p}{P}\right)\right]\mu_r l.$$

Comme exemple nous allons effectuer les calculs relatifs à un monocâble de longueur $l = 1^{km},200$ avec une montée $h = 80$ mètres pour un débit horaire $Q = 10$ tonnes. En admettant des charges unitaires $P = 120$ kilogrammes et un poids de wagonnet $p = 55$ kilogrammes, on obtiendra entre ceux-ci un intervalle :

$$t = \frac{3\,600\,P}{1\,000\,Q} = 3,6\,\frac{120}{10} \backsim 43 \text{ secondes}$$

et avec une vitesse de 2 mètres à la seconde, des distances de :

$$c = vt = 2 \times 43 = 86 \text{ mètres}$$

de telle sorte que sur la ligne il faudra :

$$\frac{2\,l}{c} = \frac{2 \times 1\,200}{86} = 28 \text{ wagonnets.}$$

D'après le chapitre 22 le câble doit avoir une section de :

$$F = \frac{P + p}{200 \times \frac{12\,000}{14\,000}} = \frac{(120 + 55)\,14}{200 \times 12} = 1^{cm^2},02.$$

Pour cette valeur nous prendrons un câble de 42 fils dont :

$$F = 1^{cm^2},07, \qquad d = 17 \text{ millimètres}, \qquad \delta = 1^{mm},8$$

et

$$q = 1^{kg},02 \text{ par mètre courant.}$$

En faisant le coefficient de sécurité $\Delta = 8$, la tension maximum, qui peut se produire près de la poulie supérieure, est :

$$S_{max} = S_1 = F \times \frac{K_z}{\Delta} = 1,07 \times \frac{12\,000}{8} \backsim 1\,600 \text{ kilogrammes.}$$

Si nous supposons que les pylônes sont à une distance moyenne $a \backsim 70$ mètres l'un de l'autre, le nombre de galets porteurs d'un même côté de la ligne sera de :

$$z = \frac{l}{a} = \frac{1\,200}{70} \backsim 17.$$

Avec les nombres que nous venons d'obtenir l'équation (53) donne :

$$1\,600 = S\left(1 + \frac{4 \times 0,012 \times 0,017 \times 17}{0,6}\right)$$
$$+ 10\left[\frac{1,02}{10} + \frac{0,278}{2}\left(1 + \frac{55}{120}\right)\right](80 + 8,5 \times 1,2).$$

D'où l'on tire la valeur de la tension près de la poulie inférieure :

$$S = \frac{1\,600 - 10\,(0,102 + 0,202)\,90,2}{1 + 0,023} = 1\,295 \backsim 1\,300 \text{ kilogrammes}$$

de sorte que le contrepoids tendeur est de $1\,300 \times 2 = 2\,600$ kilogrammes.

La tension à l'extrémité supérieure du brin des wagonnets vides est :

$$S'_1 = 1300(1-0{,}023)+10\left(0{,}102+\frac{0{,}278}{2}\times\frac{55}{120}\right)(-80-8{,}5\times 1{,}2)=1120\text{ kg.}$$

Le rapport $\frac{S_1}{S'_1}=\frac{1605}{1120}=1{,}43$ est encore suffisamment au-dessous de la limite 1,65, et la poulie suffit pour transmettre l'effort. Les paliers de cette poulie supportent un effort très grand égal à $S_1 + S'_1 = 2725$ kilogrammes, lequel serait encore beaucoup plus important si on employait un câble dur en conservant le même coefficient de sécurité.

La force motrice nécessaire est d'après l'égalité (55) :

$$N=\frac{10\times 80}{270}+\frac{1300\times 2}{37{,}5}\times\frac{4\times 0{,}012\times 0{,}017\times 17}{0{,}6}$$

$$+\left[\frac{1{,}02\times 2}{37{,}5}+\frac{10}{270}\left(1+\frac{2\times 55}{120}\right)\right](8{,}5\times 1{,}2)=3+1{,}6+1{,}3=5{,}9\text{ HP.}$$

A cette quantité on doit encore ajouter une certaine force pour vaincre les frottements des poulies et la résistance du câble au contour des poulies-guide et de renvoi. Ce supplément de force déterminé par les stations est généralement évalué approximativement; dans le précédent exemple nous prendrons comme force motrice normale environ 7 HP.

On doit toutefois remarquer que, par suite d'un mauvais graissage des paliers des galets porteurs et du câble, ou lorsque l'installation se trouve dans des conditions de climat très défavorables, la force motrice ainsi déterminée est souvent insuffisante.

En combinant le tendeur et la commande dans la station inférieure, on obtient un contrepoids un peu plus léger, mais par contre une flèche plus grande du câble supportant les wagonnets pleins. La disposition que l'on doit adopter est à déterminer pour chaque cas d'après les conditions générales de l'installation.

II. — Transporteurs système Roe.

28. Appareils d'accouplement des wagonnets. — L'appareil d'accouplement des wagonnets au câble de Roe fut un grand progrès pour les

monocâbles. Cet appareil est formé d'une traverse creuse en fonte qui

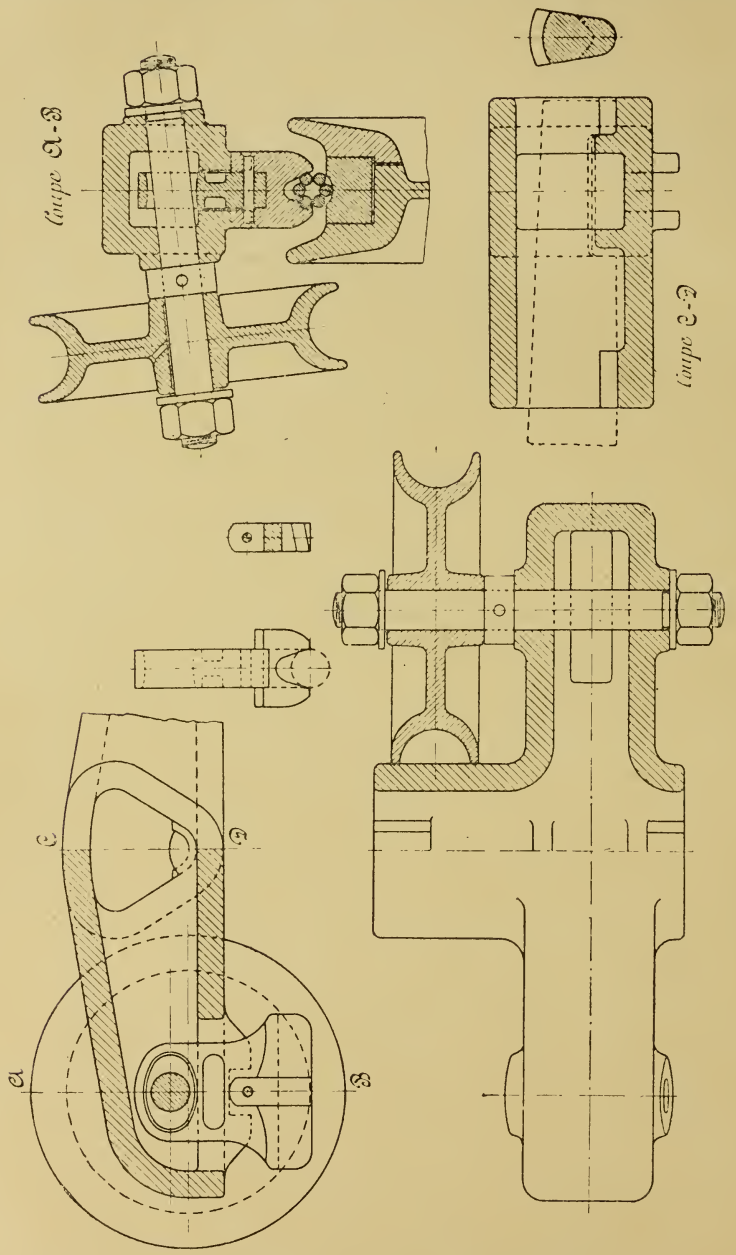


Fig. 61.

porte dans le sens longitudinal deux pinces articulées qui prennent une

position correspondant à l'inclinaison du câble (fig. 61). Ces pièces peuvent aussi se déplacer légèrement dans le sens vertical. Dans les pinces se trouve un ergot en acier d'environ 15 millimètres de largeur

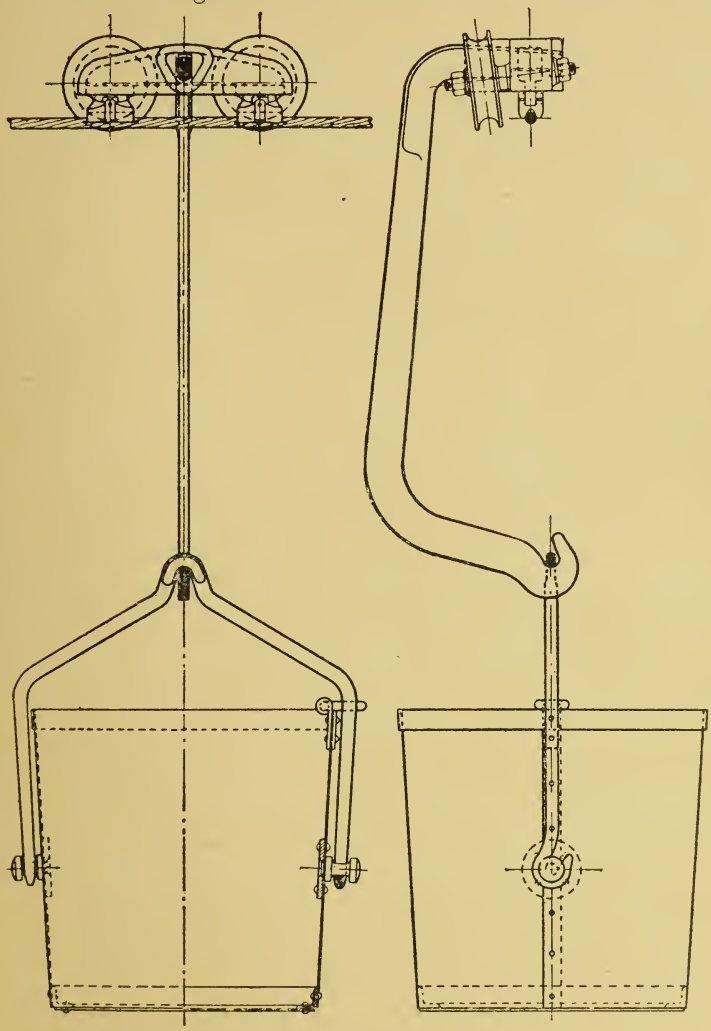


Fig. 62.

qui pénètre entre les torons du câble et s'y maintient grâce à l'enroulement des torons et au poids de la caisse de wagonnet. Ce dispositif d'accrochage qui est excessivement simple peut fonctionner en toute

sécurité sur des pentes $\frac{1}{2}$; malgré cela on ne dépasse généralement pas $\frac{1}{2,5}$. Le graissage du câble et le verglas ont très peu d'influence sur le fonctionnement de cet appareil.

La figure 61 montre en outre la fixation de la suspension à la traverse du chariot, cette disposition est très suffisante malgré sa grande simplicité ; elle permet à la suspension de se maintenir verticale même dans les fortes rampes. La figure 62 représente un wagonnet complet construit par la maison Ceretti et Tanfani de Milan et destiné au transport de faibles quantités. Dans le cas d'un grand débit, comme il a été dit dans le chapitre 21, il n'est pas nécessaire que la suspension de la caisse soit absolument libre, en outre un récipient cylindrique offre un trop faible volume et l'on doit revenir à la forme de la figure 51.

Etcheverry a construit un appareil dont le principe est le même que

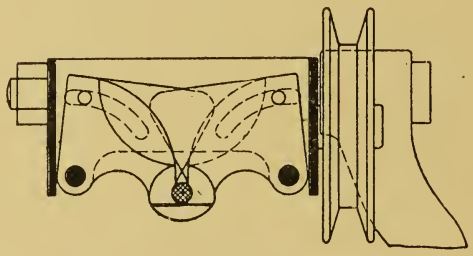


Fig. 63.

celui des bicâbles, dans lequel l'accouplement a lieu sous l'action du poids de la charge. Cet accouplement se compose d'une traverse dans laquelle sont articulées deux pièces en forme de quart de cercle, autour d'axes parallèles au câble ; les extrémités de ces secteurs sont telles qu'ils entourent presque complètement le câble. Ces machoires mobiles sont guidées par des pitons qui coulissent dans des rainures de a traverse. La figure 63 montre une des deux paires de mâchoires placées de chaque côté de l'axe de la suspension, dans sa position fermée. Lorsque les roues du wagonnet arrivent sur un rail légèrement surélevé, les deux segments s'abaissent un peu et leurs extrémités abandonnent le câble qui devient libre.

29. Pylônes. — Un deuxième perfectionnement de Roe non moins important, consiste dans sa construction des pylônes supportant le câble. Lorsque celui-ci présente une grande flèche, il est fortement plié sur chaque poulie des supports. Il en résulte alors une grande fatigue à la flexion et une augmentation du frottement du câble, ces deux effets étant inversement proportionnels à la longueur soumise à la flexion.

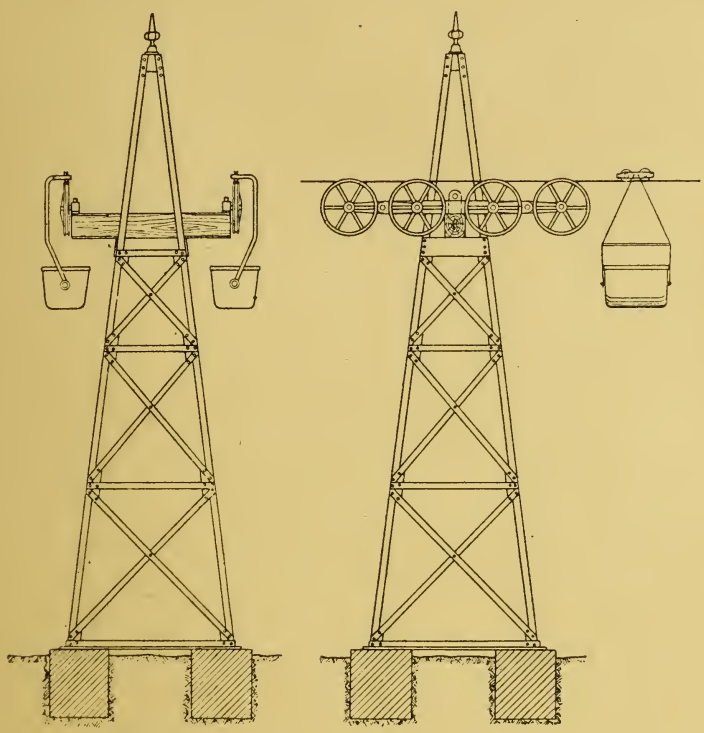


Fig. 64.

Pour obvier à ces inconvénients, Roe n'emploie qu'une poulie à chaque support pour le câble des wagonnets vides, lorsque les pylônes sont en terrain plat et suffisamment rapprochés l'un de l'autre ; pour le câble des wagonnets pleins il emploie toujours au moins deux galets porteurs. Ces poulies sont articulées aux deux extrémités d'un levier, qui est lui-même monté sur un axe horizontal lui permettant de prendre une position correspondant à la direction du câble. Lorsque le profil présente de

grandes portées ou des surélévations, les pylônes portent deux poulies du côté des wagonnets vides tandis que du côté des wagonnets chargés on dispose une paire de ces poulies articulées à chaque extrémité d'un levier tournant autour d'un axe horizontal (fig. 64). Avec cette disposition le passage des pylônes s'effectue sans une trop grande fatigue, la

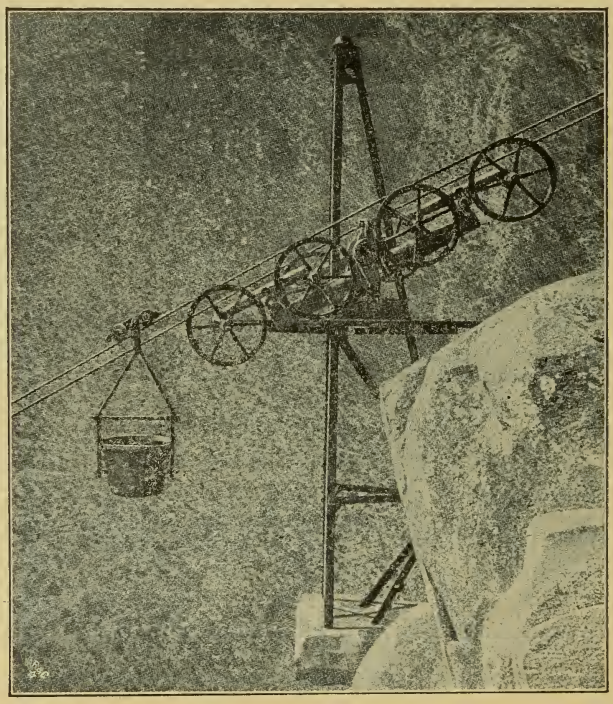


Fig. 65.

pression du câble étant ainsi répartie également sur les quatre galets. Afin d'obtenir des leviers aussi légers que possible, on les construit généralement creux et en acier coulé.

La figure 65 représente un pylône métallique dont le câble a une inclinaison de 1/2. Celui de la figure 66 est formé par quatre colonnes en bois rond maintenues par des diagonales ; on peut remarquer que le passage s'effectue tout doucement suivant un grand arc. Les

poteaux ne sont pas enfouis dans le sol, mais noyés dans du béton afin d'augmenter leur durée.

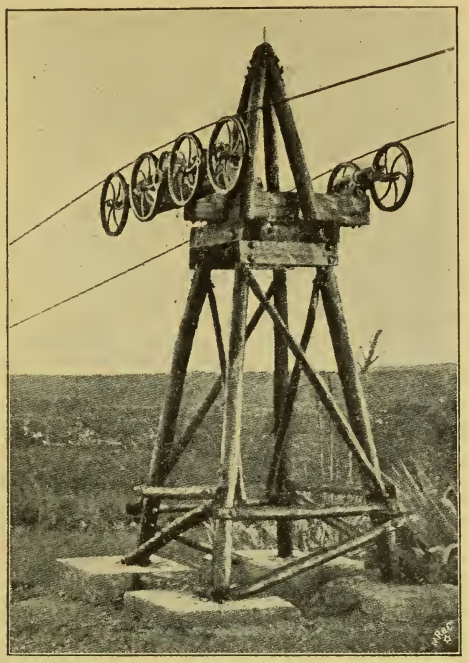


Fig. 66.

30. Tracé de la ligne. — La disposition qui vient d'être décrite a permis à Roe et Bedlington, les deux constructeurs du Ropeways-Syndicate, d'avoir des portées allant jusqu'à 600 mètres et de suivre presque exactement le profil du terrain.

La figure 67 montre le profil longitudinal d'un chemin aérien monocâble de 2 600 mètres de longueur dont le débit est de 30 tonnes à l'heure avec des charges unitaires de 500 kilogrammes ; le nombre des pylônes est de 18. On remarque que la ligne suit exactement la coupe du terrain ; les pylônes sont en général très bas et leurs points d'appui se trouvent suivant une parabole dont la flèche au milieu est la moitié de celle que prendrait le câble sur la section entière considérée. On peut admettre que ce tracé est le plus bas que l'on puisse exécuter avec les

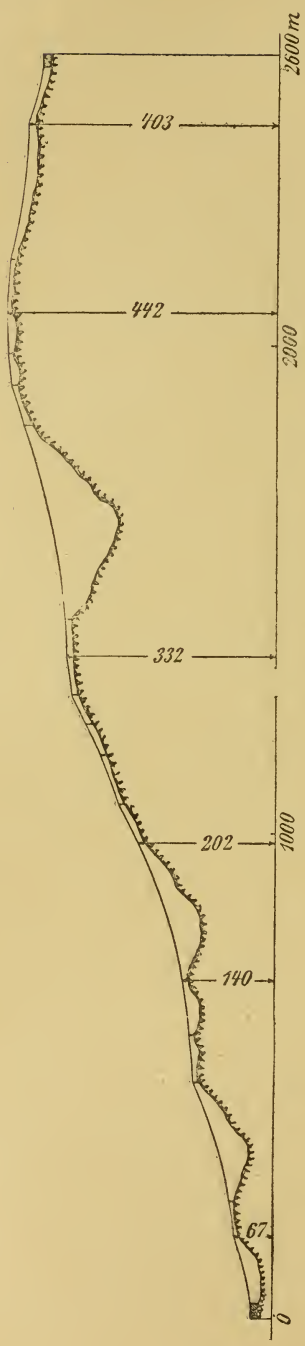


Fig. 67.

câbles à torons si l'on veut être sûr que, dans les positions les plus défavorables des wagonnets, le câble ne quittera pas les galets porteurs.

La distance normale entre deux pylônes peut être considérée comme étant de 100 mètres. Leur nombre et leur position sont déterminés par le profil du terrain.

31. Stations terminales. — La station motrice simple de Roe est en tous points semblable à celle représentée par la figure 57. Lorsque la pente est suffisante le mouvement du câble est automatique et l'installation ne nécessite pas de moteur. Si l'inclinaison moyenne de la ligne est très grande, la poulie à câble de la station supérieure doit être freinée afin de maintenir la vitesse dans des limites convenables. Dans ce but on emploie presque exclusivement des freins à bande ; la poulie de renvoi et la poulie de frein sont souvent coulées d'une seule pièce (fig. 68). Comme sécurité on prévoit toujours deux freins commandés chacun par une vis et un volant à main.

Dans les chemins aériens de ce genre présentant de grandes portées, il est absolument nécessaire que la poulie de renvoi se déplace afin de compenser les grandes variations de flèche qui se produisent au moment du passage d'un wagonnet dans une de ces travées. La poulie à câble terminale coulisse dans ce cas avec son palier sur un chemin de glis-

sement horizontal formé simplement par des fers plats vissés sur des poutres (fig. 69). Deux barres fixées au support de la poulie constituent le coulisseau qui porte deux poulies folles. Un câble métallique à fils fins ayant ses extrémités fixées dans une poutre traversale de la station, contourne les deux poulies folles précédentes, puis passe ensuite sur deux poulies fixes pour venir supporter un contrepoids à

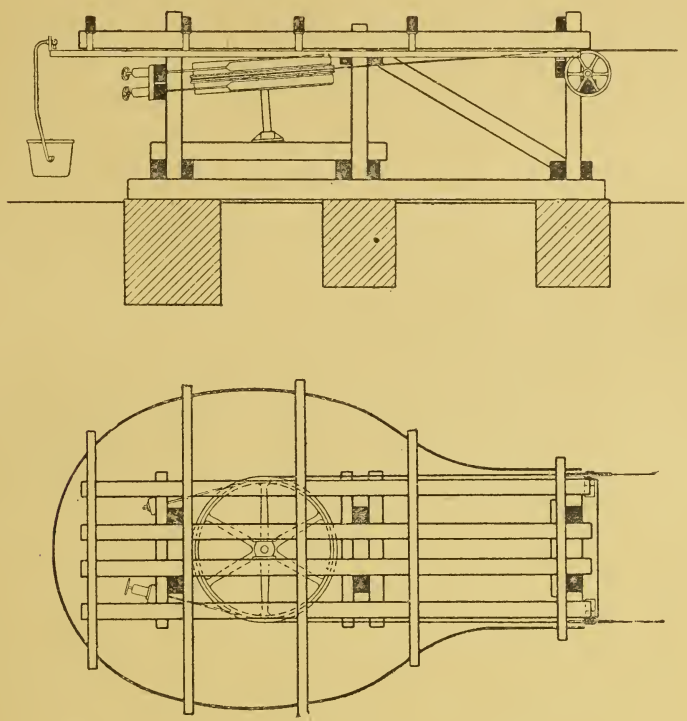


Fig. 68.

l'aide d'un galet. Avec cette disposition le contrepoids tendeur ne correspond qu'à la moitié de la tension exercée sur la poulie de renvoi et le câble souple se supporte que le 1/4 de cette tension. On est ainsi conduit à un câble à fils fins de petit diamètre pour lequel des poulies d'environ 300 millimètres suffisent. Dans le calcul d'un tendeur de ce genre on doit tenir compte du rendement exact des poulies à câble. Si on admet que $\eta \simeq 0,96$ pour une poulie entourée par un câble sur la

moitié de sa circonférence et $\eta \sim 0,98$ pour une poulie guidant sur un quart de circonférence, la valeur du contrepoids sera :

$$G = \frac{0,5\ Q}{0,96 \times 0,98 \times 0,96} \sim 0,55\ Q$$

Q étant la traction que l'on doit exercer sur la poulie de renvoi.

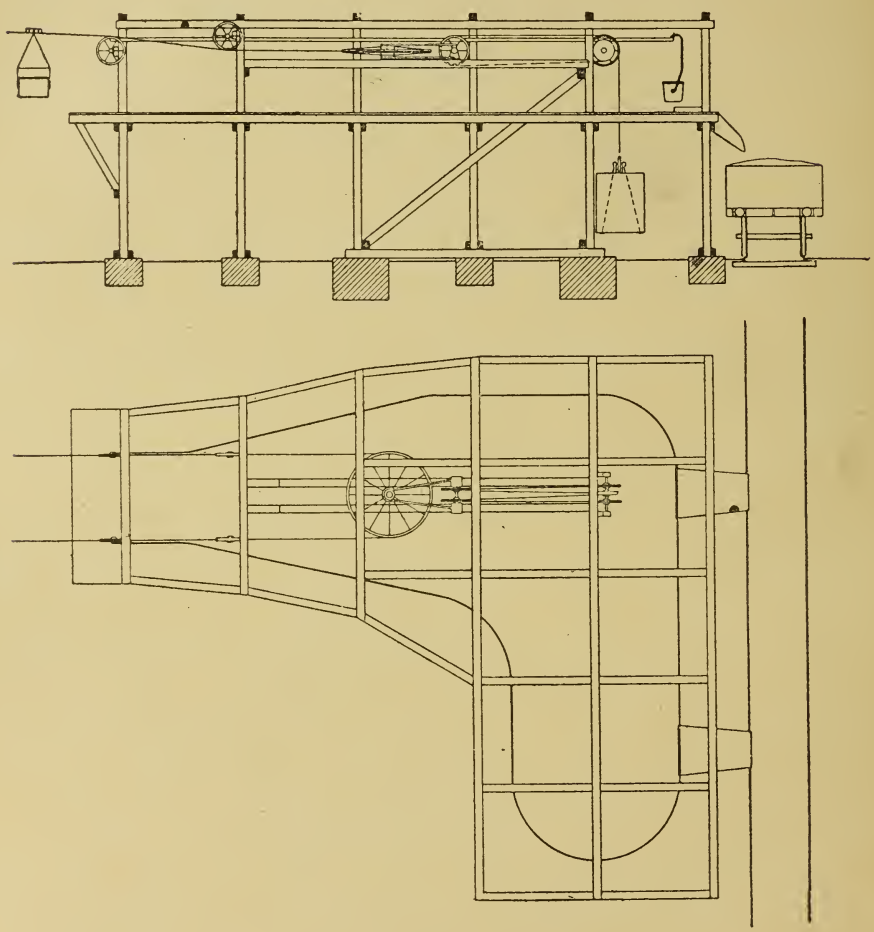


Fig. 69.

Outre ces quelques détails, la station n'a rien de particulier. Elle est suffisamment haute pour permettre de vider directement les wagonnets dans des wagons de chemins de fer, à l'aide de couloirs.

32. Données spéciales de construction. — Dans ce genre de transporteurs les câbles ne sont pas soumis à l'usure comme dans le système Hodgson, aussi les prend-on plus faibles avec des fils plus fins.

On doit naturellement tenir compte de ce que plus les charges sont lourdes, plus les fils doivent être gros, sans quoi ces derniers seraient rapidement brisés par l'ergot des appareils qui pénètre entre les torons. Pour des charges utiles allant jusqu'à 150 kilogrammes, des fils de $1^{mm},3$ à $1^{mm},5$ correspondant à des câbles de 12 à 14 millimètres, suffisent généralement. Lorqu'on a des charges utiles de 300 kilogrammes on emploie des câbles de 18 millimètres ayant des fils de 2 millimètres ; dans le cas de charges de 450 kilogrammes on prend des câbles de 20 millimètres avec fils de $2^{mm},2$ de diamètre. Pour les charges utiles atteignant 600 kilogrammes on utilise un câble de 22 à 23 millimètres de diamètre. Roe admet la charge $\frac{P+p}{F} = 300$ kilogrammes par centimètre carré lorsque le cœfficient de rupture $K_z = 14000$ kilogrammes par centimètre carré et cette valeur augmente en même temps que la résistance du câble. Dans ce système de transporteur on emploie rarement des câbles ayant une résistance à la rupture inférieure à 14000 kilogrammes par centimètre carré.

La vitesse du câble dépend également du poids des charges : avec 200 kilogrammes on peut encore aller à $2^{m},50$ à la seconde et même au-dessus ; pour des charges de 300 kilogrammes on prend généralement $1^{m},50$ à la seconde et pour 500 kilogrammes rarement plus de 1 mètre.

Naturellement dans le cas de transporteurs fonctionnant automatiquement sans moteur on peut prendre $v = 2$ à $2^{m},50$ à la seconde, même pour de grosses charges ; dans le cas de petites on peut faire $v = 3$ mètres à la seconde.

La tension du câble peut être calculée également dans ce cas au moyen de l'équation du chapitre 17. Le diamètre des galets porteurs étant comme dans le système Hodgson de 600 millimètres avec un axe $d_1 = 50$ millimètres, on a :

$$\mu = \mu_r = \frac{0,07 \times 0,05}{0,6} \sim \frac{6}{1000}. \tag{56}$$

Le câble se pliant beaucoup moins que dans le premier système

en passant sur plusieurs poulies placées les unes derrière les autres, on peut prendre en moyenne $\xi = 0{,}006\ d$.

Comme exemple nous allons calculer l'installation dont le profil longitudinal est représenté par la figure 67. Le débit horaire $Q = 30$ tonnes, les charges unitaires sont de $P = 500$ kilogrammes y compris le wagonnet de poids $p = 110$ kilogrammes, la hauteur $h = 345$ mètres et la vitesse $v = 2^m{,}50$ à la seconde. Le tableau ci-après contient les abscisses l et les ordonnées h du profil longitudinal, les différences de longueur ou portées a et de hauteur b ainsi que le nombre des poulies i disposées sur chaque pylône du côté des wagonnets chargés.

Nos des pylônes	Abscisses l en m.	Ordonnées h en m.	Portées a en m.	Différences de hauteurs b en m.	Nombre de poulies i
Station	0	379			1
			120	+ 24	
1	120	403			4
			280	+ 32	
2	400	435			4
			110	+ 7	
3	510	442			4
			83	— 2	
4	593	440			2
			67	— 15	
5	660	435			4
			83	— 23	
6	743	412			4
			392	— 77	
7	1 135	335			4
			78	— 3	
8	1 213	332			2
			78	— 19	
9	1 291	313			4
			61	— 24	
10	1 352	289			2
			64	— 22	
11	1 416	267			2
			103	— 26	
12	1 519	241			4
			80	— 39	
13	1 599	202			4
			283	— 62	
14	1 882	140			4
			113	— 11	
15	1 995	129			2
			93	— 5	
16	2 088	124			4
			225	— 55	
17	2 313	69			4
			91	— 12	
18	2 404	57			4
			136	— 23	
Station	2 540	34			1
					64

Avec un câble très dur dont $K_z = 18\,000$ kilogrammes par centimètre carré la section du câble nécessaire est :

$$F = \frac{500 + 110}{300 \times \frac{18\,000}{14\,000}} = 1^{cm^2},60$$

correspondant à un câble $d = 22$ millimètres dont $\delta = 2^{mm},2$, $F = 1^{cm^2},59$ et $q = 1^{kg}51$ le mètre.

En faisant le coefficient de sécurité $\Delta = 8$ la tension maximum admissible à la poulie de frein supérieure sera de :

$$S_1 = 1,59\,\frac{18\,000}{8} = 3\,580 \text{ kilogrammes.}$$

En tenant compte des valeurs de b et h, et du fait que le transport s'effectue toujours vers le bas, si la ligne est divisée en un nombre convenable de tronçons, l'égalité 25 du chapitre 17 donne :

$$\begin{aligned}3\,580 = S\Big[1 &- \frac{6}{1\,000}\left(\frac{55}{225} - \frac{5}{93} + \frac{39}{80} - \frac{26}{103} + \frac{24}{61} - \frac{3}{78} + \frac{23}{88} + \frac{24}{120}\right)\\ &- \frac{4 \times 0,006 \times 0,022 \times 64}{0,6}\Big] + 30\left[\frac{1,51}{30} + \frac{0,278}{2,5}\left(1 + \frac{110}{500}\right)\right]\\ &\times\Big[+ 345 - 6 \times 2,53 - \frac{4 \times 0,006 \times 0,022}{0,6}(90 + 101 + 46 + 77)\\ &- \frac{6}{1\,000}\left(-\frac{55}{225} \times 90 - \frac{5}{93} \times 16 - \frac{39}{80} \times 101 - \frac{26}{103} \times 26 - \frac{24}{61} \times 46 - \frac{3}{78} \times 3\right.\\ &\left.- \frac{23}{83} \times 77 - \frac{24}{120} \times 24 - \frac{19^2}{78} - \frac{15^2}{67} - \frac{2^2}{83} - \frac{7^2}{110} - \frac{32^2}{280}\right)\Big]\end{aligned}$$

ou

$$\begin{aligned}3\,580 = S\,(1 &- 0,0076 - 0,0563) + 30\,(0,050 + 0,136)\\ &\times (345 - 15,18 - 0,276 + 1,123).\end{aligned}$$

Comme on voit, avec de grandes portées a, l'influence du membre déterminé par la pression du câble sur les poulies des pylônes est infiniment petite par rapport à celle des autres membres.

Le système de Roe est à ce point de vue supérieur aux bicâbles.

Le calcul donne comme tension dans la station inférieure :

$$S = \frac{3\,580 - 1\,845}{0,936} = 1\,850 \text{ kilogrammes.}$$

Cette valeur permet de déterminer dans la station supérieure la tension du brin des wagonnets vides qui repose sur les pylônes par 2 fois moins de poulies que le brin des wagonnets pleins ; on a :

$$S'_1 = 1\,850\left(1 + 0{,}0076 + 0{,}0563 \times \frac{33}{64}\right) + 30\left(0{,}050 + 0{,}136 \times \frac{110}{610}\right)$$
$$\times (+ 345 + 15{,}18 + 0{,}28 - 1{,}12) = 2\,720 \text{ kilogrammes.}$$

Le rapport des deux tensions :

$$\frac{S_1}{S'_1} = \frac{3\,580}{2\,720} = 1{,}32$$

est plus petit que la valeur limite 1,65 et l'enroulement autour d'une demi-poulie suffit.

La force à freiner est donnée par l'égalité très simple :

$$N = \frac{(S_1 - S'_1)\,v}{75} = \frac{(3\,580 - 2\,720)\,2{,}5}{75} = 29 \text{ HP.}$$

On a admis le même nombre de poulies sur les deux cotés de la ligne, comme il y en a deux fois plus pour le brin des wagonnets pleins que pour celui des wagonnets vides, si l'on veut obtenir un résultat exact, on doit multiplier le nombre correspondant des calculs précédents par

$$\frac{1 + 0{,}5}{2} = 0{,}75.$$

Par suite des différentes résistances que doit vaincre le câble dans ses déviations des stations, on peut admettre que la force maximum à freiner est N = 28 HP. La traction considérable de

$$3\,580 + 2\,720 = 6\,300 \text{ kilogrammes,}$$

qui agit sur la poulie de frein supérieure nécessite une construction très robuste absorbant par son frottement environ 1 HP.

III. — Transporteurs avec wagonnets fixés au câble.

33. Détails de construction. — Dans une installation à faible débit avec de petites charges on emploie parfois un monocâble modifié : dans

ce cas les wagonnets, le plus souvent formés par une plateforme, sont fixés au câble et contournent avec lui les poulies terminales des stations. Dans la plupart des constructions actuelles de ce genre, la fixation du wagonnet sur le câble est obtenue au moyen de mâchoires à vis et la suspension repose sur la vis même au moyen d'un œil. De temps à autre on déplace les wagonnets pour empêcher le câble de se rouiller sous les pinces où il n'est pas graissé.

La liaison des wagonnets au câble étant de cette façon absolument sûre, on peut donner aux chemins aériens de ce genre une très grande inclinaison. D'un autre côté on peut faire suivre à la ligne exactement le profil du terrain en donnant au câble une faible tension. Le mode de fixation des wagonnets dans ces transporteurs ne permet pas d'avoir de grandes portées, car le câble se fatiguerait trop sous les étroites pinces d'accouplement. La grandeur moyenne des portées varie, selon l'écarte-

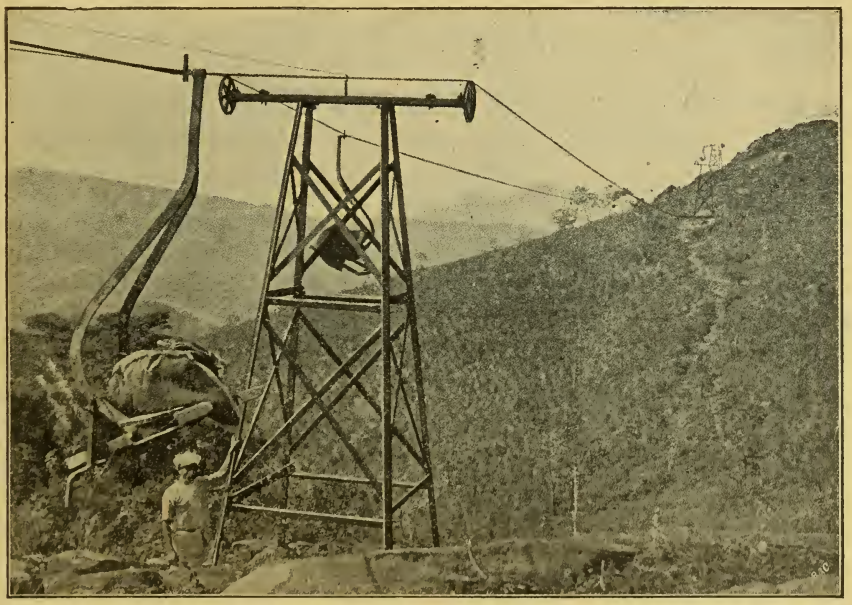


Fig. 70

ment des wagonnets, de 50 à 75 mètres ; dans certains cas on peut aller jusqu'à 120 mètres. Lorsque la ligne suit exactement la forme des vallées, le câble se soulève et quitte facilement les galets porteurs des py-

lônes ; pour éviter ceci on dispose de chaque côté des poulies des pylônes dangereux un petit galet de pression.

Lorsque le chargement et le déchargement sont effectués à la main, les charges doivent être enveloppées et on prend généralement une vitesse de $0^m,50$ à la seconde. La vitesse maximum de ces chemins aériens est de 1 mètre à la seconde et dans ce cas le déchargement doit s'effectuer en culbutant la caisse. La figure 70 montre un dispositif de culbutage d'une plateforme. Le chemin aérien dont la figure 70 représente un tronçon a été construit par la maison Bullivant et Cie à Ceylan pour le transport de feuilles de thé ; ce transporteur possède plusieurs grandes portées qui ont été rendues possibles par le faible poids des charges. Malgré cela le câble est assez fortement coudé près des pylônes.

La poulie-guide de la station inférieure doit pouvoir se déplacer et la tension du câble se faire soit automatiquement soit à la main au moyen d'un palan comme dans beaucoup d'installations de Bullivant.

Le diamètre du câble est en général de 12 à 13 millimètres.

31. Force motrice et commande. — La distance entre les wagonnets est ordinairement de 50 mètres au plus ; si nous supposons une distance de 30 mètres, une vitesse de 1 mètre à la seconde et des charges de 50 kilogrammes, nous obtiendrons comme débit horaire maximum :

$$Q = 2 \times 60 \times 50 = 6000 \text{ kilogrammes.}$$

On peut en déduire que ce genre de monocâble est d'une importance secondaire.

La force motrice se calcule d'après les indications du chapitre 32. Comme coefficient de résistance de frottement on admet pour les installations du système Hodgson $\mu_r = \frac{8,5}{1000}$, pour celles construites d'après Roe $\mu_r = \frac{6}{1000}$. La raideur du câble donne dans ce cas pour valeurs de ξ 0,012 d et 0,006 d.

La maison Ceretti et Tanfani construit un genre de transporteur de ce système tout à fait spécial : ces chemins aériens sont transportables et établis d'après les données de Maglietta. Les pylônes sont formés par de légers tubes en acier assemblés entre eux par des colliers et maintenus

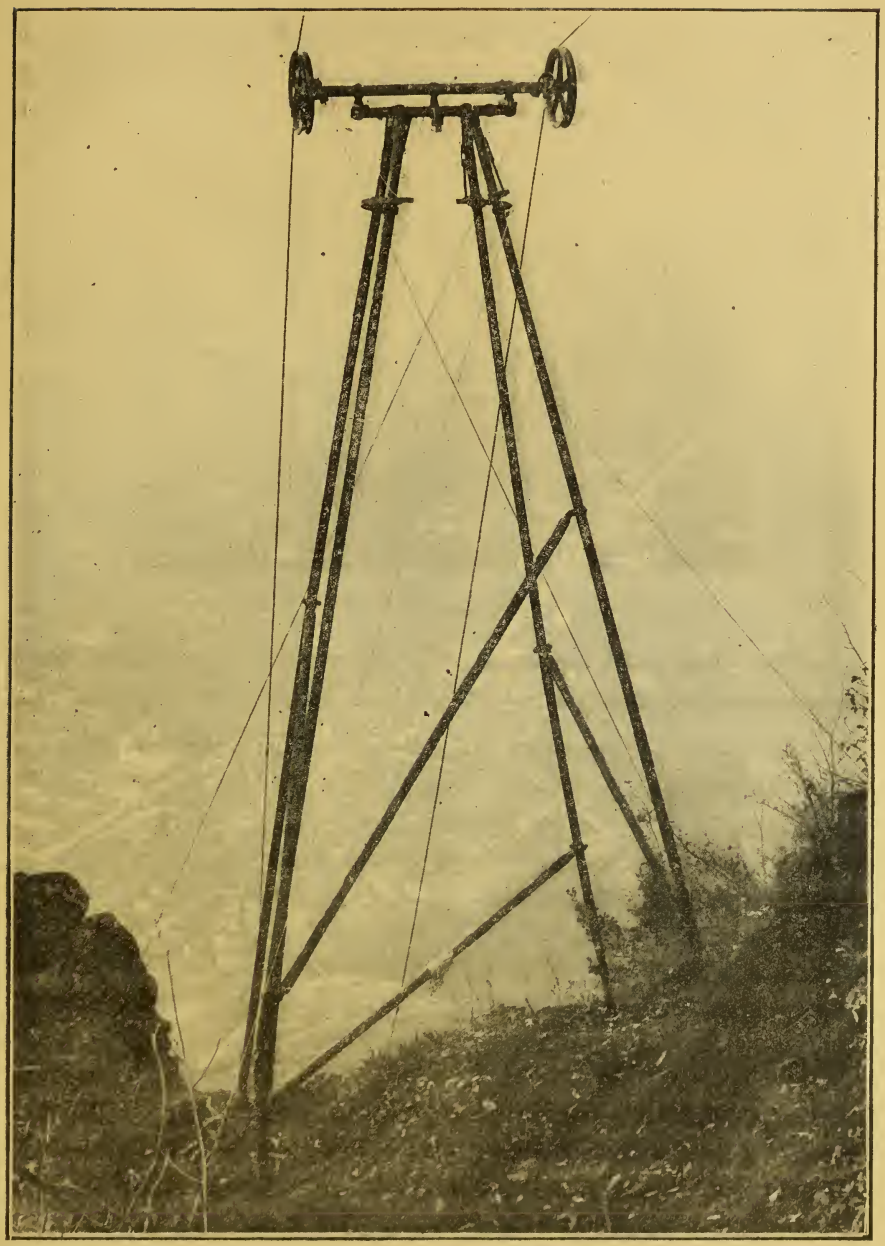


Fig. 71.

en position par des haubans ancrés dans le sol (fig. 71). Les wagonnets sont fixés une fois pour toutes au câble et celui-ci est formé par des tronçons de longueurs différentes assemblés entre eux par des manchons appropriés pour le passage des galets porteurs et des poulies terminales.

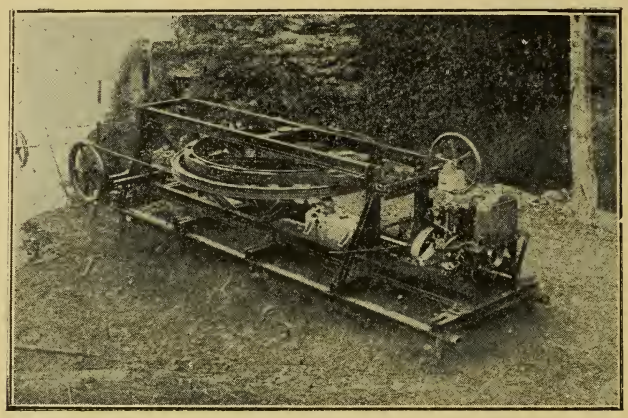


Fig. 72.

Les figures 72 et 73 représentent les deux stations terminales d'une installation de ce genre ; les cadres sont également formés par des tubes

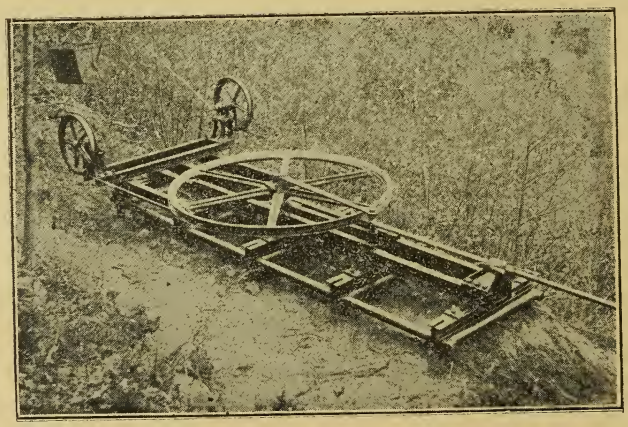


Fig. 73.

et les différentes pièces sont fixées à des fers profilés. Toutes les parties coulées sont en acier afin d'éviter qu'elles ne se cassent pendant le trans-

port, et elles pèsent au maximum 150 kilogrammes. Une des stations est prévue avec une poulie de frein et une poulie motrice ; on se sert de l'une ou de l'autre selon les conditions de fonctionnement de l'installation, la force motrice est fournie par un moteur, à benzine d'automobile. L'autre station contient la poulie tendeuse dont la position est réglée par une vis.

C. — BICÂBLES

I. — Transporteurs avec deux voies de roulement et un câble tracteur en mouvement continu.

35. Câbles porteurs. — Dans les chapitres 22 et 32 on a déterminé les diamètres des câbles des monocâbles en appliquant simplement les formules données, lesquelles sont fonctions des charges et ont été déterminées par des essais pratiques.

Les efforts que doivent supporter les câbles porteurs des bicâbles sont tout autres. La surface de contact du galet de roulement et du câble se rapproche du point et l'usure du câble est très faible ; on n'a pas alors de frottement de glissement, mais un roulement pur de la roue. Malgré cela on doit prendre les câbles porteurs assez gros et aussi durs que possible afin d'éviter qu'ils soient peu à peu écrasés par le passage continu des charges roulantes.

La fatigue d'un fil à la flexion, donnée dans le chapitre 19, est égale à $\frac{V^2}{P}$, V étant la pression d'une roue et P la force longitudinale ou tension du fil ; ce rapport montre que la fatigue d'un câble à la flexion sous l'action d'un galet varie d'une façon inversement proportionnelle à la tension P. Pour cette raison, on abaisse le coefficient de sécurité à la rupture Δ du câble d'autant plus que les charges à transporter sont plus grandes, tout en ayant soin d'employer des câbles en acier dont la dureté varie comme les charges.

Lorsqu'on emploie des câbles très souples ayant une résistance $K_z = 6\,000$ kilogrammes par centimètre carré, on ne doit pas descendre au-dessous de 6 comme valeur de Δ ;

avec $K_z = 9\,500$ kgr. par cm², la valeur minimum de $\Delta = 5$
$K_z = 12\,000$ » » $\Delta = 4{,}5$
et $K_z = 14\,500$ » on prend $\Delta = 4$;

dans quelques cas particuliers on est déjà descendu jusqu'à 3.

Pour chaque chemin aérien on doit calculer les câbles porteurs comme nous l'avons indiqué précédemment ; la courbe représentée par la figure 74 donne les diamètres des câbles spiroïdaux avec une assez grande approximation. Dans cette figure, qui est établie d'après des installations

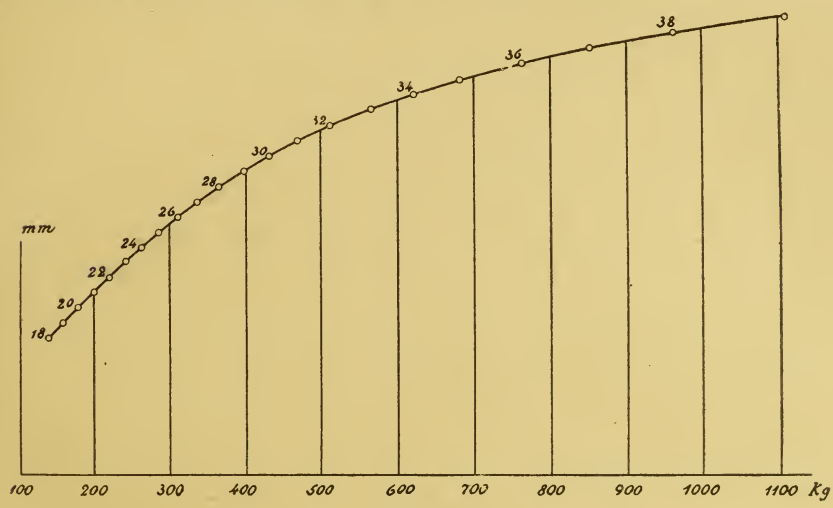


Fig. 74.

existantes, les abscisses représentent la charge totale appliquée sur les deux roues d'un wagonnet, c'est-à-dire la charge utile P, le poids propre du wagonnet p et le poids du câble tracteur.

Actuellement, on emploie presque exclusivement des câbles spiroïdaux pour la voie des wagonnets vides. Comme chemin de roulement des wagonnets chargés, on utilise de plus en plus les câbles de construction semi-close décrits dans le chapitre 8 ; leur diamètre est d'environ 2 ou 3 millimètres plus faible que celui des câbles spiroïdaux supportant la même charge, excepté lorsqu'ils doivent traverser des surélévations de

terrain qui déterminent toujours une grande pression du câble tracteur sur les voies de roulement. Si dans ce cas-là on n'emploie pas des câbles de construction close, on doit prendre un diamètre de 2 ou 3 millimètres plus fort et de l'acier ayant une résistance à la rupture de 14 500 kilogrammes par centimètre carré.

Les chiffres donnés par la figure 74 peuvent être diminués ou augmentés de quelques millimètres selon que les wagonnets sont très éloignés ou très rapprochés les uns des autres. Le diamètre des câbles est encore souvent influencé par le coût prévu de l'installation que parfois l'on ne doit pas dépasser, ou par la question de concurrence.

Autant que possible on ne doit pas avoir plus de 500 kilogrammes de pression sur un même galet de roulement, car dans ce cas, même avec un câble de construction close, on obtient une usure très rapide et une très grande flèche dans les portées. Nous reviendrons plus tard sur quelques exceptions.

36. Coussinets d'appui. — Les câbles porteurs reposent sur des coussinets ou sabots d'appui en fonte présentant une courbure de grand rayon. Leur longueur varie en même temps que la pression sur le pylône et la

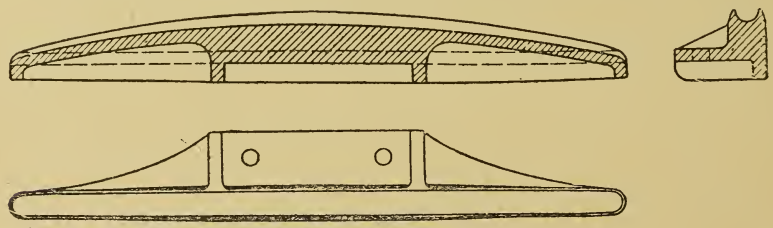


Fig. 75.

flexion du câble ; elle est généralement comprise entre $0^m,60$ et $0^m,90$. La figure 75 représente un tel coussinet long de $0^m,60$ et pesant 20 kilogrammes.

Devant une grande portée ou lorsqu'on a une inflexion brusque dans le profil longitudinal de la ligne, on emploie naturellement des coussinets de grande longueur. Quand la portée dépasse 350 mètres, dans les transporteurs avec grosses charges unitaires, la maison Ad. Bleichert

et Cie utilise des coussinets spéciaux ayant jusqu'à 1^m,20 de longueur.

Malgré tout, dans le cas d'un grand débit, le câble peut venir de temps à autre appuyer sur l'extrémité du coussinet, occasionnant ainsi une usure considérable et même une rupture des fils. J. Pohlig A. G. et Th. Otto et Ce emploient dans ces chemins aériens des coussinets arti-

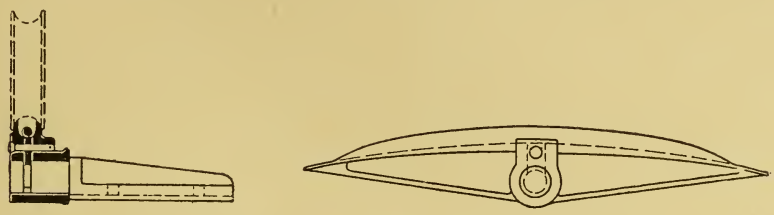


Fig. 76.

culés basés sur le même principe que les rouleaux porteurs des pylônes des monocâbles Roe. La figure 76 montre un de ces sabots monté fou sur un axe, lequel est fixé au pylône ; un taquet coulissant dans une rainure de l'axe empêche le coussinet de sortir de son support. La figure montre également comment les galets des chariots roulent sur

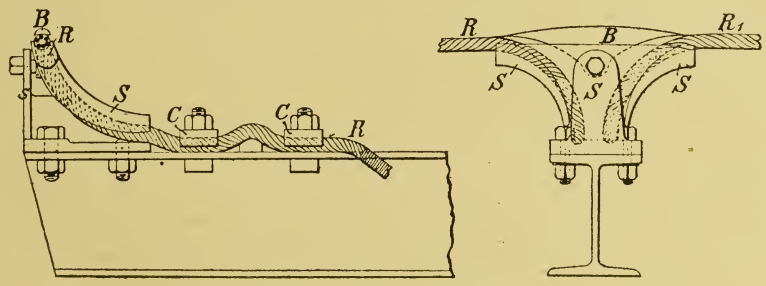


Fig. 77.

ces coussinets à joues surélevées. Avec ce dispositif, le câble ne vient jamais presser contre les extrémités des sabots et de plus il ne travaille que d'un côté comme dans les portées. La maison R. White et Sons à Widnes, Lancashire, emploie un sabot d'appui bien différent des précédents : elle fixe le câble à tous les pylônes, ce qui lui permet d'exécuter toutes les déviations voulues aussi bien dans le plan horizontal que dans

le plan vertical de la ligne. Les deux bouts de câbles R et R_1 reposent sur un socle en fonte S et sont fixés au pylône par les plaques C (fig. 77). Une pièce articulée B permet aux wagonnets de passer d'un câble sur l'autre. Dans le cas de pylônes placés de chaque côté d'une grande portée ou sur une ondulation du profil, Ad. Bleichert et Cie protègent les câbles porteurs en munissant les coussinets d'appui de rails amovibles en acier. Ces derniers présentent en leur milieu une petite entaille dans laquelle passe un fer plat destiné à maintenir le câble en place.

37. Les pylônes. — Les pylônes supportant les câbles sur le parcours de la ligne sont généralement en bois ; on ne les construit en fer que lorqu'ils ont une très grande hauteur, que les charges unitaires sont lourdes ou qu'ils doivent remplir des conditions spéciales. Les supports

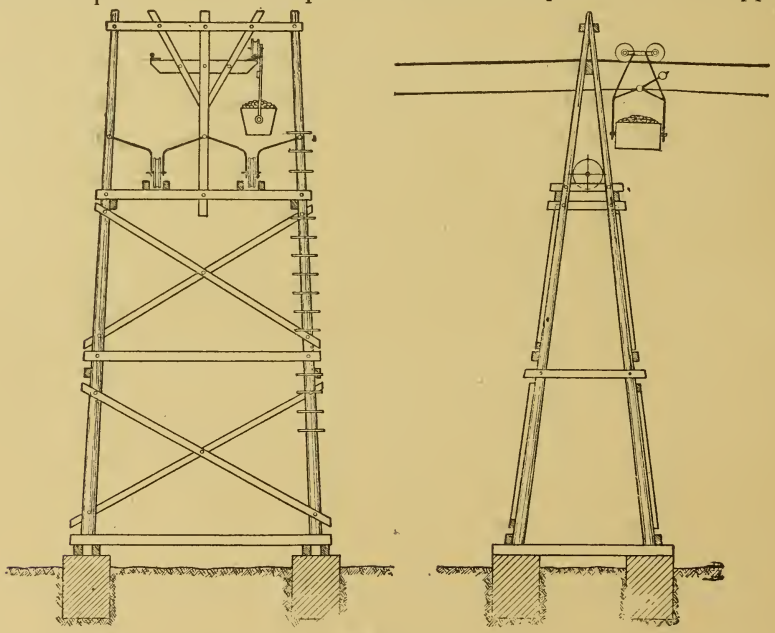


Fig. 78.

en bois sont le plus souvent constitués par des poteaux enfoncés de 1m,50 dans le sol et consolidés ensuite par de la terre grasse ou de l'argile battue. Ces constructions pourrissent malheureusement très vite près du sol, même lorsqu'on les badigeonne avec du goudron ou un autre produit préservateur.

On protège avantageusement les pieds des pylônes, en faisant reposer chaque poteau sur une couche de béton suffisamment résistante et en

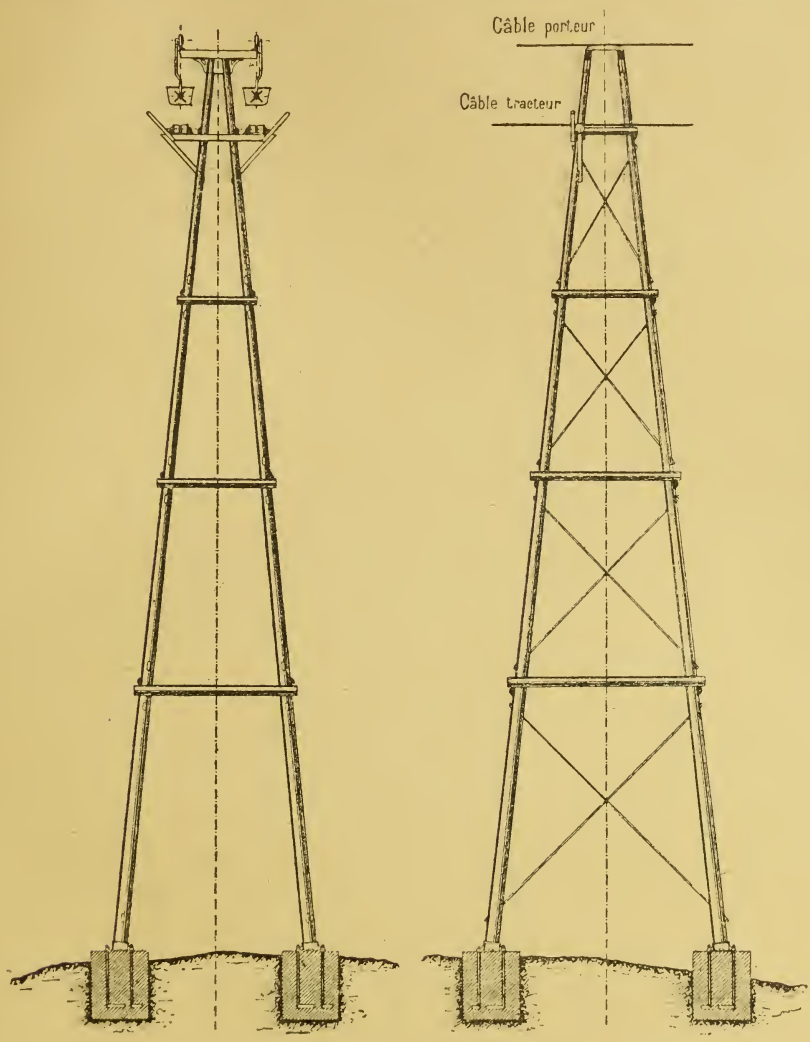


Fig. 79.

noyant leur base dans un bloc de béton de 30 à 35 centimètres de côté.

Le plus souvent les extrémités des poteaux sont encastrées entre des moises en bois dur qui reposent sur des fondations en maçonnerie.

La figure 78 représente un pylône d'environ 10 mètres de hauteur construit par Th. Otto et Cie. Il entre dans sa construction environ $2^{m3},5$ de bois ronds, 1 mètre cube de bois équarris et environ 40 kilogrammes de boulons d'assemblage, boulons d'ancrage, plaques et rondelles.

Le pylône en bois de la figure 79 a été construit par J. Pohlig ; d'une hauteur de 20 mètres, il est muni de coussinets d'appui en fonte et de consoles également en fonte supportant les moises supérieures. Les quatre colonnes sont solidement réunies entre elles par des traverses en bois et des diagonales en fer rond.

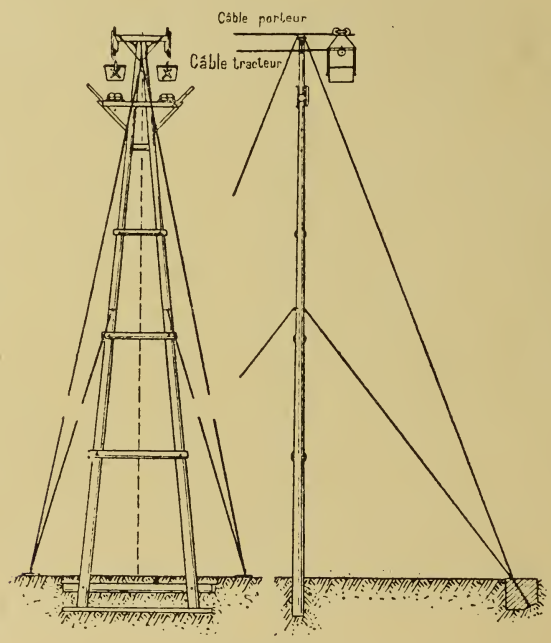


Fig. 80.

La figure 80 montre une construction très simple : elle se compose de deux poteaux réunis par des traverses et maintenus en position par huit haubans ancrés dans quatre blocs de maçonnerie.

La figure 81 représente un pylône de faible hauteur, avec coussinet d'appui oscillant (d'après Th. Otto et C°).

En général les rouleaux porteurs du câble tracteur sont placés à une hauteur telle que les wagonnets puissent passer commodément au-

dessus d'eux ; la cote de l'axe du câble porteur à l'axe du rouleau est d'environ $2^m,25$.

Sous l'action du vent le câble tracteur oscille et peut se poser à côté d'un rouleau porteur ; lorsqu'il est soulevé ensuite par un wagonnet, il se trouve retenu sous la construction supportant le rouleau. Pour obvier à cet inconvénient on munit les pylônes d'un dispositif en bois

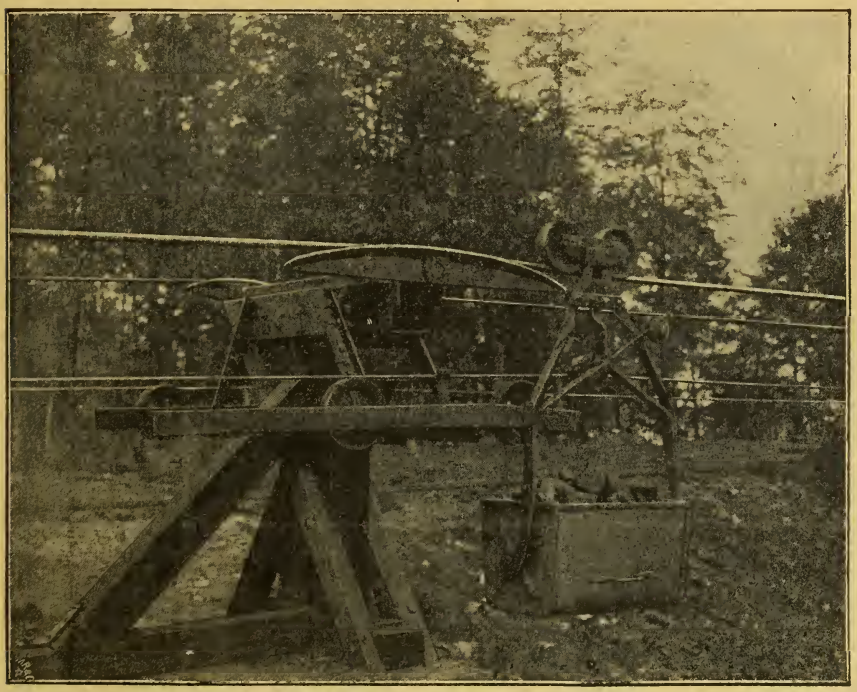


Fig 81.

ou en fer sur lequel le câble tracteur tombe pour glisser ensuite sur le rouleau.

On peut donner aux pylônes en fer une forme analogue à celle du pylône en bois de la figure 80 ; les colonnes sont alors formées par des fers en ⊥ et noyées à leur base dans un bloc de béton ou dans une fondation en maçonnerie. La forme la plus souvent adoptée pour les pylônes métalliques est celle représentée par la figure 82, constituée par des cornières et des fers plats. Le poids d'un tel pylône dans une installation moyenne, est d'environ 160 kilogrammes par mètre, pour des hau-

teurs variant de 6 à 15 mètres. Si pour une raison quelconque le pylône doit être plus fort, le poids du mètre varie selon la charge et la hauteur de 150 à 350 kilogrammes. Dans un chemin de fer aérien de débit moyen, un pylône en fer de 4 mètres de hauteur pèse 750 Kilogrammes et un de 25 mètres 6000 kilogrammes.

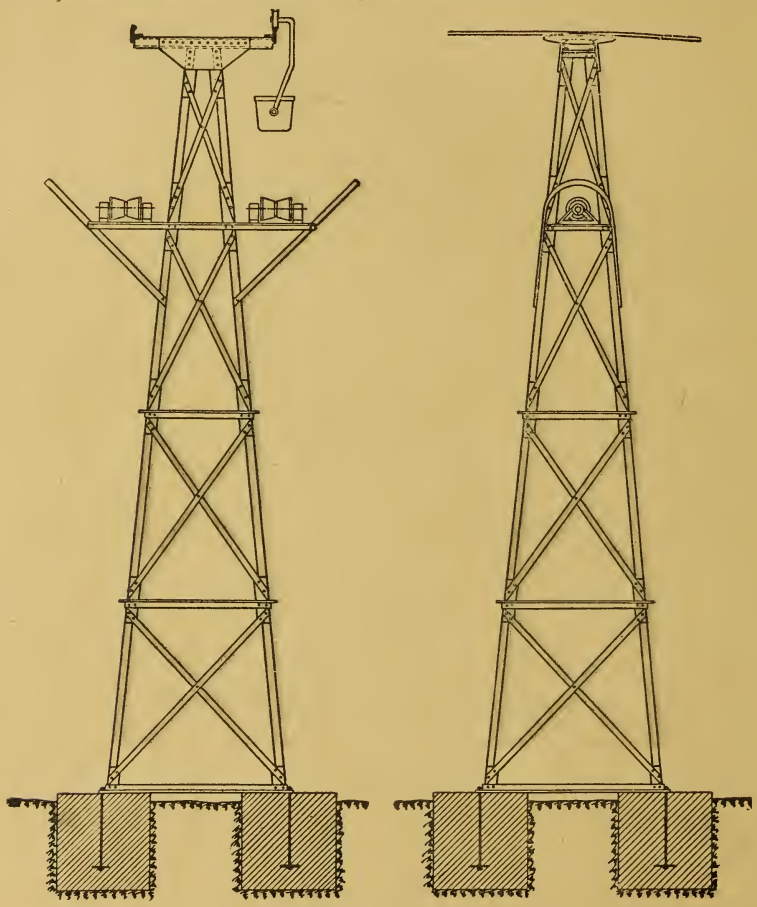


Fig. 82.

Lorsque les charges à transporter sont faibles mais encombrantes, elles oscillent sous l'action du vent et viennent frapper contre le pylône construit d'après la figure 82. Dans ce cas là on doit donner à la partie supérieure une forme plus large qui entraîne naturellement un surplus de poids.

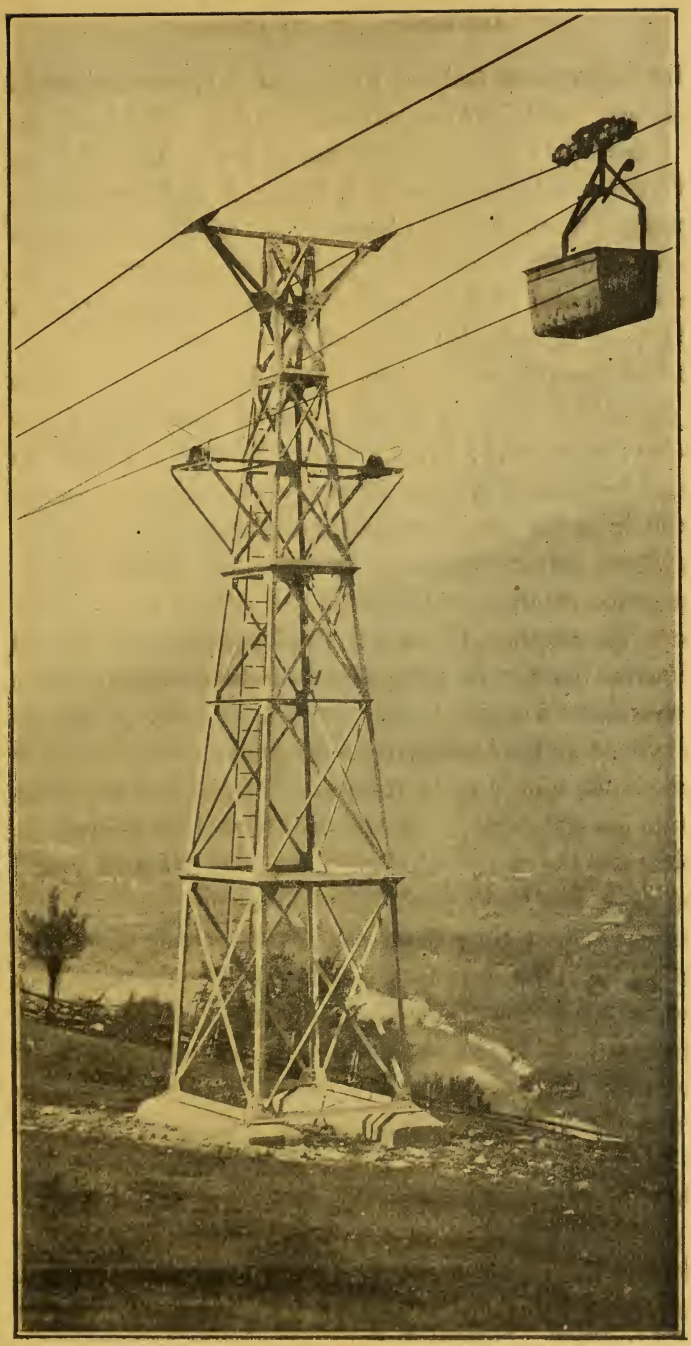


Fig. 83.

Les plus importantes maisons s'occupant de chemins aériens ne construisent actuellement leurs supports qu'avec des barres de fer ou des profilés de 4 mètres de longueur au maximum ; la figure 83 montre un pylône d'après une construction de J. Pohlig. A. G. Les différentes pièces qui le constituent sont de faible longueur et relativement légères ; elles peuvent par suite être facilement transportées et montées.

Les fers composant les colonnes de coin sont presque toujours inclinés de 1/10 sur la verticale ; on prend avantageusement comme largeur de tête $0^m,40$ mesurée à l'extérieur des colonnes. Afin d'avoir une construction agréable à l'œil on prendra comme écartement des traverses horizontales : $0^m,7$; $0^m,8$; $1^m,0$; $1^m,3$; $1^m,7$; $2^m,2$ etc. Les diagonales seront ainsi inclinées à environ 45° et le calcul de la construction entière se trouvera de ce fait considérablement simplifié.

Les pylônes doivent supporter le poids des câbles et des wagonnets, la pression résultant de la tension des câbles, déterminée au commencement du chapitre 13 et qui dans certains cas peut être très grande, l'action horizontale provenant du frottement des câbles porteurs sur les coussinets d'appui, et enfin l'action du vent. Le vent perpendiculaire à la ligne souffle également sur les câbles et sa pression est beaucoup plus grande que la force résultant du frottement des câbles, aussi effectue-t-on généralement les calculs avec le vent transversal. On détermine rapidement les efforts qui existent dans les différentes parties d'un pylône au moyen du tracé graphique de Crémona.

Nous allons donner ci-après un exemple de calcul, mais tout d'abord voyons quels sont les efforts horizontaux et verticaux que doit supporter un pylône. D'un côté nous avons une portée $l_1 = 150$ mètres et une voie horizontale, de l'autre une portée $l_2 = 530$ mètres et une descente $b = 35$ mètres, Les wagonnets d'un poids $p = 160$ kilogrammes contiennent une charge $P = 400$ kilogrammes et se suivent à une distance $c = 120$ mètres.

Le câble de construction close des wagonnets pleins a un diamètre $q_1 = 35$ millimètres et un poids $d_1 = 7^{kgr}10$ par mètre ; le câble spiroïdal des wagonnets vides a un diamètre $d_2 = 22$ millimètres avec $q_2 = 2^{kgr}42$ par mètre ; pour le câble tracteur on a $d_3 = 14$ millimètres et $q_3 = 0^{kgr}72$ par mètre.

Les deux câbles porteurs ont une résistance à la rupture $K_2 = 12\,000$ kilogrammes par cmq et sont calculés avec un coefficient de sécurité de 4,5.

Supposons qu'un wagonnet se trouve exactement au-dessus du pylône et désignons par G le poids d'un wagonnet et du câble tracteur s'y rapportant c'est-à-dire $p + P + q_3 \times c$, on a alors sur un coussinet d'appui la charge :

$$Q = G\left(1 + \frac{l_1 - c}{l_1} + \frac{l_2 - c}{l_2} + \frac{l_2 - 2c}{l_2} + \frac{l_2 - 3c}{l_2} + \frac{l_2 - 4c}{l_2}\right)$$
$$= G\left(1 + \frac{30}{150} + \frac{410}{530} + \frac{290}{530} + \frac{170}{530} + \frac{50}{530}\right) = \text{environ } 2{,}94\ G.$$

Le côté des wagonnets chargés reçoit ainsi une pression

$$Q_1 = 2{,}94\,(160 + 400 + 0{,}72 \times 120) \backsim 1900 \text{ kilogrammes}$$

et le côté des wagonnets vides

$$Q_2 = 2{,}94\,(160 + 0{,}72 \times 120) \backsim 720 \text{ kilogrammes.}$$

A ceci vient s'ajouter la résultante de tension horizontale du câble $H_s = q\frac{R}{\Delta}$; le chapitre 13 nous donne comme pression sur un pylône :

$$V = q\frac{l}{2} \pm q\frac{b}{a} \cdot \frac{R}{\Delta}.$$

Avec $\frac{R}{\Delta} \backsim 3\,060$ mètres on a pour le côté des wagonnets chargés

$$V_1 = 7{,}10\left(\frac{1}{2} \times 150 + \frac{1}{2} \times 530 + \frac{35}{530} \times 3\,060\right) \backsim 3\,840 \text{ kilogrammes.}$$

Du côté des wagonnets vides $\frac{R}{\Delta} \backsim 3\,200$ mètres et

$$V_2 = 2{,}42\left(\frac{1}{2} \times 150 + \frac{1}{2} \times 530 + \frac{35}{530} \times 3\,200\right) \backsim 1\,330 \text{ kilogrammes.}$$

Nous avons supposé que le pylône était au point culminant du tronçon de ligne considéré, autrement on devrait encore retrancher la différence de hauteur de $\frac{R}{\Delta}$.

Le pylône doit supporter en plus de ces charges verticales, l'action

horizontale du vent ; d'après le chapitre 14 cet effort sur un wagonnet, y compris le câble tracteur, est de :

$$H' = 0{,}122\, v^2 \times F_0 + \frac{1}{1.250} v^2 \times d \times c.$$

Dans cette équation F_0 est la surface du wagonnet exposée au vent que nous ferons égale à $0{,}8 \times 0{,}75 = 0{,}6$ m², v la vitesse maximum du vent, soit environ 35 mètres à la seconde.

On a alors :

$$H' = 35^2 (0{,}122 \times 0{,}60 + \frac{1}{1\,250} \times 1{,}4 \times 120) \sim 254 \text{ kilogrammes.}$$

Sur un coussinet on a par suite la pression horizontale

$$H = 2{,}94\, H' + \frac{1}{1\,250} v^2 \times d \frac{l_1 + l_2}{2}$$

du côté des wagonnets pleins

$$H_1 = 2{,}94 \times 254 + \frac{1}{1\,250} \times 35^2 \times 3{,}5 \frac{150 + 530}{2} \sim 1\,910 \text{ kilogremmes}$$

et du côté des wagonnets vides

$$H_2 = 2{,}94 \times 254 + \frac{1}{1\,250} \times 2{,}2 \times \frac{150 + 530}{2} \sim 1\,480 \text{ kilogrammes.}$$

En dernier lieu viennent s'ajouter les efforts de frottement des câbles porteurs qui agissent dans le sens de la ligne.

$$x_1 = \mu V_1 = 0{,}1 \times 3\,840 \sim 380 \text{ kilogrammes}$$
$$x_2 = \mu V_2 = 0{,}1 \times 1\,330 \sim 130 \text{ kilogrammes}$$

dont le moment de rotation est supporté par les croisillonnements horizontaux du pylône.

Pour le calcul des différentes barres au flambage, on applique la formule d'Euler $\mathfrak{J} = \frac{P l^2 \Delta}{(2)\pi^2 \mathcal{E}}$, dans laquelle on fait le coefficient de sécurité $\Delta = 3 - 4$. Comme le vent est un facteur très important de notre calcul précédent, le pylône se trouvera calculé avec une sécurité de 5 à 6 si

l'on ne considère que les poids des wagonnets et des câbles. Le facteur entre parenthèses 2 est valable seulement pour le calcul des colonnes d'angle.

Dans le cas de grands pylônes, pour ne pas avoir une surface de base

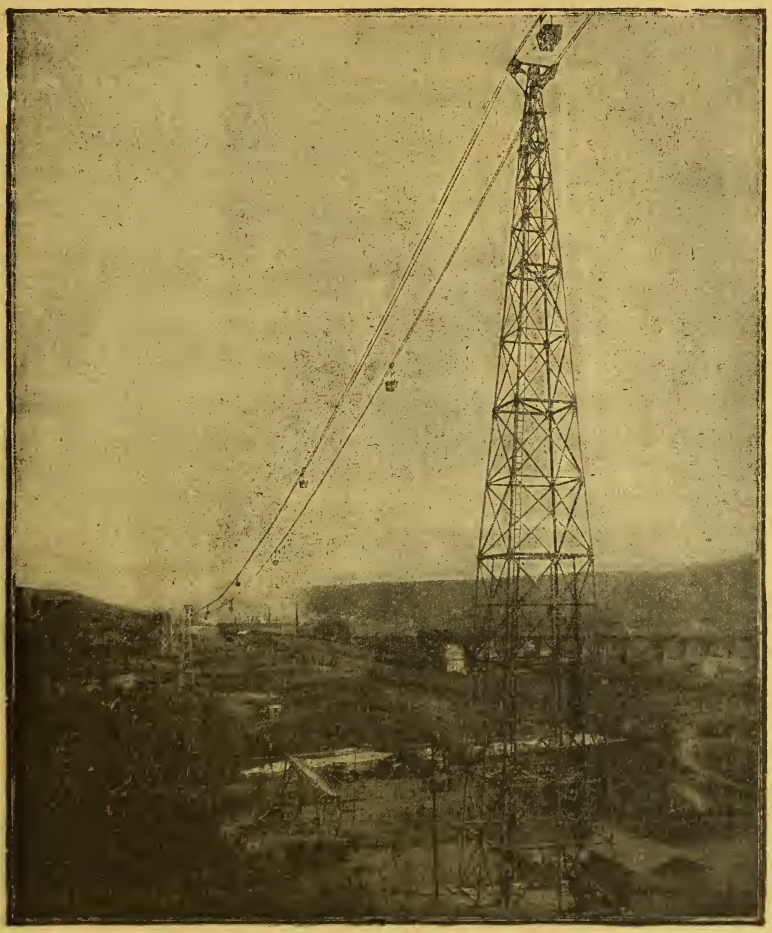


Fig. 84.

exagérée, on renforce la partie inférieure de la pyramide en ajoutant au milieu de chaque face un fer ⊥ ; la figure 84 montre un pylône de 40 mètres construit par J. Pohlig. On peut dans ce cas incliner davantage les diagonales inférieures que les supérieures.

La figure 85 représente au contraire un pylône élargi au pied, de 14 mètres de hauteur, construit par la maison Neyret-Brenier et Cie. Les

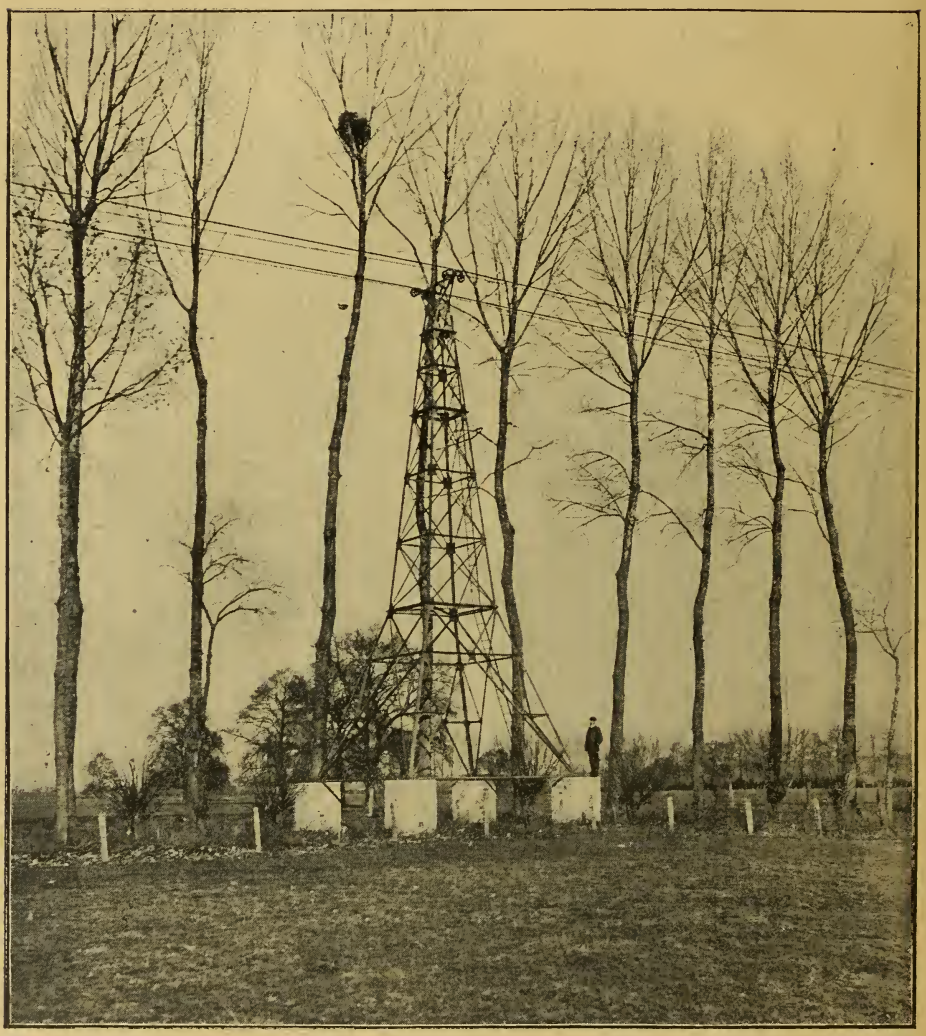


Fig. 85.

câbles reposent sur deux ensembles oscillant autour d'un axe horizontal.

Les fondations placées du côté des wagonnets vides doivent être suf-

fisamment lourdes pour empêcher le pylône de se renverser, et ceci avec une sécurité minimum de 1,5. La pression des fondations sur le sol du côté des wagonnets chargés peut être d'environ 3 kilogrammes par centimètre carré dans le cas d'un bon terrain et ne doit pas dépasser 1,5 à 2 kilogrammes dans un sol peu ferme. Comme l'action du vent sur les grands pylônes est également très importante dans le sens des câbles porteurs, il est préférable de ne pas exécuter les fondations comme elles sont représentées par la figure 83, mais de donner à chacune une section carrée de 0,75 à 1 mètre de côté.

38. Rouleaux porteurs du câble tracteur. — Le câble tracteur des bicâbles est en général peu tendu et il prend entre les wagonnets une flèche assez considérable ; aussi doit-on le supporter aux pylônes afin d'empêcher qu'il vienne reposer sur le sol.

Les figures précédentes représentent différents systèmes de pylônes en bois et en fer. Pour amener le câble tracteur sur les rouleaux porteurs, on place, comme nous l'avons déjà dit, de chaque côté de ceux-ci

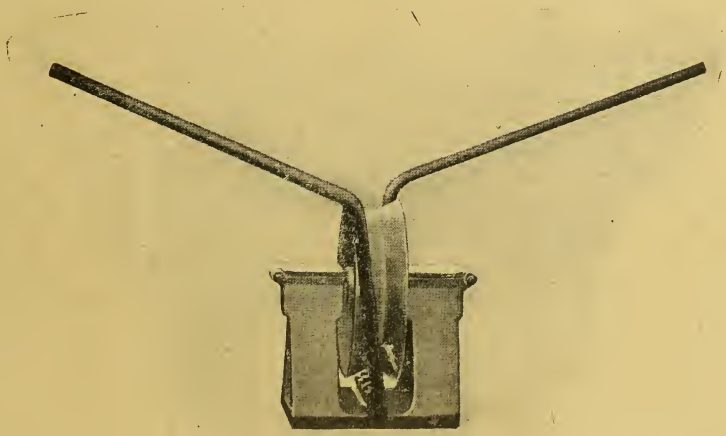


Fig. 86.

des guides en fer rond ou plat, ou des lattes de bois (fig. 82 et 83). Le plus souvent ces dispositifs de guidage sont en fer rond et fixés latéralement aux paliers supportant les rouleaux (fig. 78). La Benrather Mas-

chinenfabrik A. G, à Benrath, fixe ses guides sous le galet même afin d'être absolument sûre que le câble tracteur ne vienne pas se coïncer entre le fer rond et le rouleau (voir fig. 86).

Les rouleaux porteurs en fonte sont sujets à une usure très rapide, c'est pourquoi on emploie en général un des deux types suivants : le premier (fig. 86) est en fonte et très léger, pouvant ainsi être remplacé à peu de frais ; le deuxième est en deux pièces avec couronne amovible au milieu. Le remplacement de cette garniture centrale en fer forgé se fait facilement et est peu coûteux. La figure 89 représente une troisième construction très lourde dans laquelle la jante est renforcée par un bourrelet intérieur.

Les galets sont généralement clavetés sur leurs axes qui tournent dans des paliers à graïsse consistante munis quelquefois de garnitures en antifriction. Le diamètre des rouleaux dépend de leur genre de construction et du diamètre du câble tracteur ; on donne environ 200 millimètres à ceux à large jante et 250 à 300 millimètres à ceux de construction légère. Un rouleau porteur à large jante avec paliers et axe pèse environ 25 kilogrammes, tandis qu'un rouleau léger pèse de 16 à 18 kilogrammes. Dans les changements brusques de pente, on emploie avantageusement de grandes poulies de 500 à 600 millimètres de diamètre.

Les axes sur lesquels sont montés les rouleaux porteurs ont ordinairement un diamètre de 25 millimètres et la résistance qu'ils offrent par leur frottement est

$$\mu_r = \frac{\mu_1 d}{D} = \frac{0{,}07 \times 25}{200} - \frac{0{,}07 \times 25}{300}.$$

On a ainsi pour les petits rouleaux :

$$\mu_r \sim \frac{9}{1000}$$

et pour les grands :

$$\mu_r \sim \frac{6}{1000}.$$

L'appareil d'accouplement de Th. Otto et Cie fixé à la partie supérieure du chariot de roulement, avec câble tracteur à l'intérieur des voies, nécessite un dispositif de guidage tout spécial. La figure 87 représente un

rouleau-guide relié au support du câble porteur, les deux câbles étant presque à la même hauteur. Lorsque les coussinets d'appui du câble

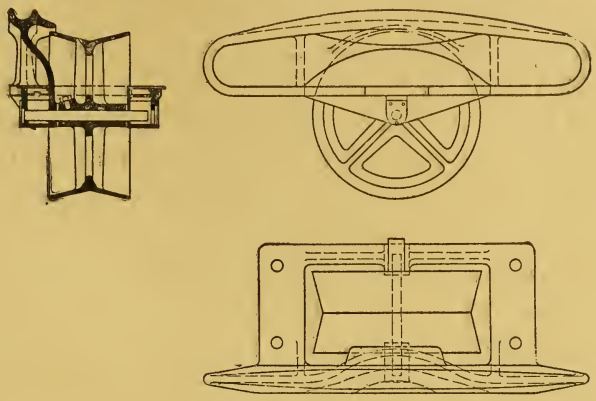


Fig. 87.

porteur sont oscillants, on emploie la construction représentée par la figure 88, dans laquelle à chaque extrémité du support se trouve un

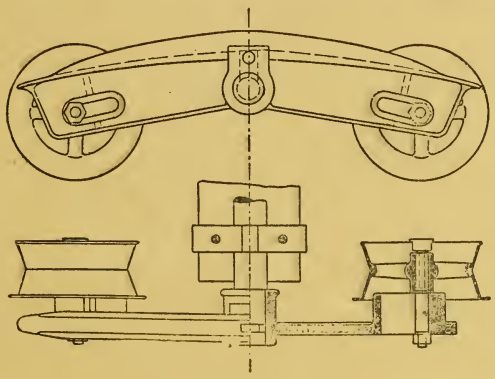


Fig. 88.

galet qui peut être déplacé à volonté dans une glissière. Les axes des paliers sont en acier et creux pour permettre le graissage.

339. Tendeurs des câbles porteurs. — Les câbles porteurs sont généralement ancrés par un bout dans une station et tendus par des contrepoids placés à l'autre extrémité. Dans les constructions modernes on ramène presque toujours les deux extrémités des câbles vers l'axe des voies :

pour cela on emploie des coussinets spéciaux de déviation aux entrées et sorties de chaque station.

Les câbles porteurs étant trop raides pour contourner les poulies des tendeurs, on a employé longtemps à cet effet des chaînes reliées d'un côté aux câbles par des manchons d'accouplement analogues à ceux de la ligne et de l'autre côté aux contrepoids. Ces chaînes constamment animées d'un mouvement de va-et-vient, étaient sujettes à une usure rapide et pouvaient se briser brusquement en occasionnant de graves accidents : aussi actuellement n'emploie-t-on pour le passage de ces poulies que des câbles très souples à torons plats ou triangulaires. Les diamètres des poulies à chaînes sont d'environ $0^m,500$ tandis que ceux des poulies-guide des câbles varient de $0^m,800$ à $1^m,20$, selon le diamètre de ces derniers. Les câbles tendeurs souples travaillant constamment à la flexion doivent avoir une résistance aussi grande que les câbles porteurs.

Autrefois les contrepoids tendeurs étaient généralement constitués par des caisses en bois remplies de pierres, morceaux de fer, fonte ou autres

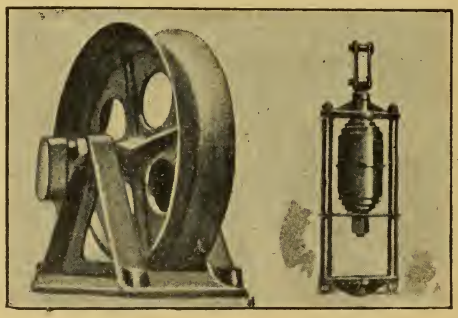
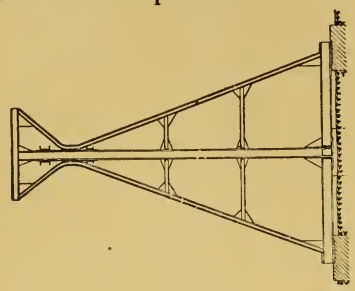


Fig. 89. Fig. 90.

débris. Actuellement les caisses en bois sont souvent remplacées par des constructions métalliques plus durables ou par des corps cylindriques de vieilles chaudières. Certaines maisons constituent leur contrepoids avec des plaques ou des blocs de béton placés les uns au-dessus des autres dans une cage métallique. On rencontre encore parfois, surtout dans les constructions anglaises, des chemins aériens sans tendeur automatique ; les câbles se terminent par un palan et la tension est réglée selon les besoins au moyen d'un treuil (voir fig. 192). Pour les petites lignes ne

dépassant pas 120 mètres, un ressort dans le genre de ceux des tampons de chemin de fer, appliqué à l'une des extrémités, suffit; la figure 90 représente un tel dispositif.



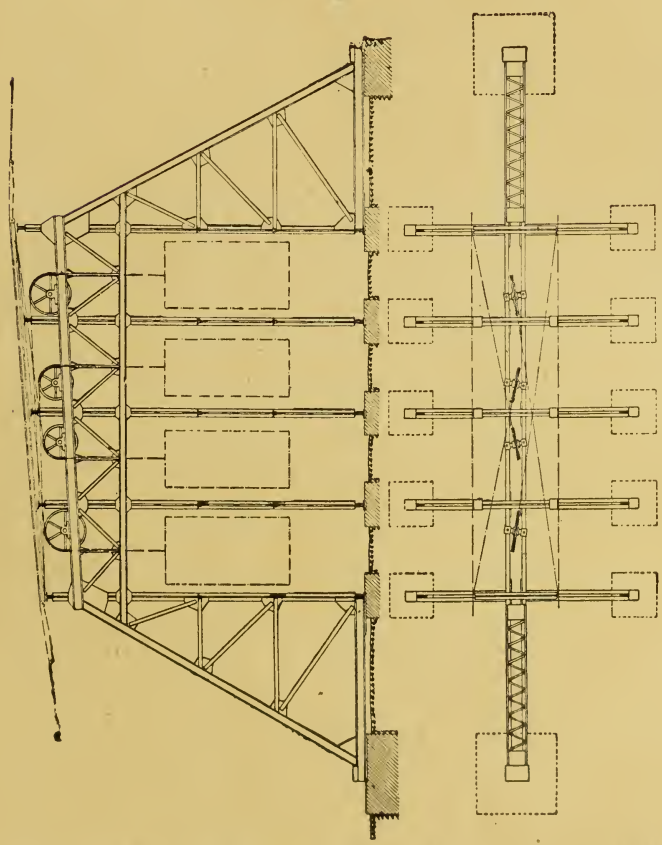


Fig. 91.

Par suite de la grande pression des câbles sur les sabots, ceux-ci offrent une certaine résistance au déplacement longitudinal qui s'effectue

sur tout le parcours. En admettant un coefficient de frottement $\mu = 0,1$, tous les transporteurs dépassant $2^{km},500$ doivent être sectionnés en longueurs de 2 à 3 kilomètres et chaque tronçon doit être muni d'un tendeur automatique. A la jonction des différentes sections, les wagonnets roulent sur des voies suspendues analogues à celles des stations terminales. Lorsque les conditions du terrain le permettent, dans les chemins aériens de grande longueur, on place souvent les dispositifs de tension de deux tronçons consécutifs dans la même station.

La figure 91 représente un tel tendeur double en fer construit par la

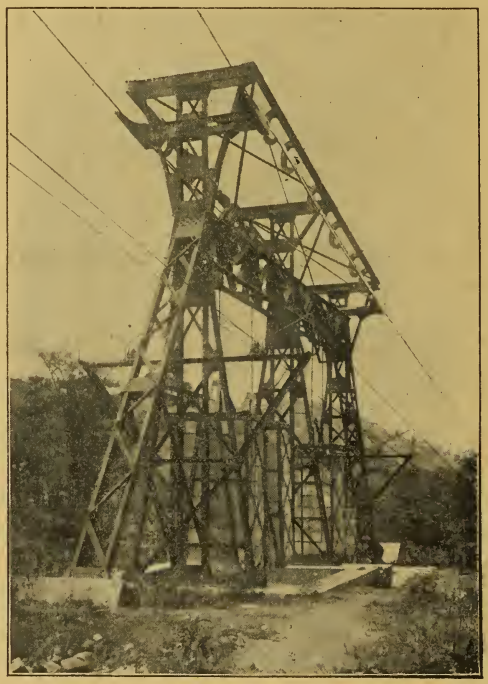


Fig. 92.

Maison Neyret-Brenier et Cie de Grenoble. Les câbles porteurs sont ramenés vers l'axe de la voie au moyen de câbles extra-flexibles à torons plats, guidés par de grandes poulies. Certaines maisons remplacent les poulies de déviation des tendeurs par des rails cintrés suivant un grand rayon et soigneusement polis (voir fig. 152). La figure 92 représente

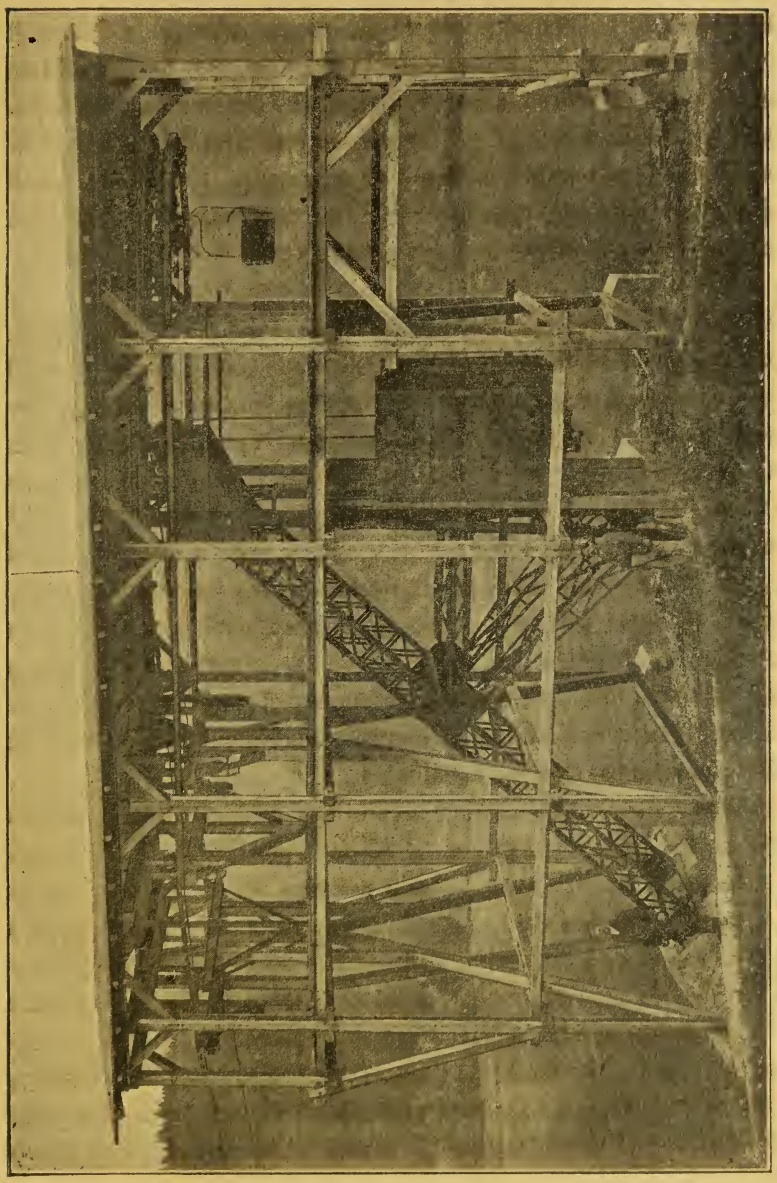


Fig 93,

une station tendeuse double exécutée par la Maison Ad. Bleichert et Cie dans laquelle les contrepoids pénètrent dans des fosses en béton.

Pour réduire les oscillations des wagonnets en traversant les stations intermédiaires de tension, on prévoit parfois des rails-guide contre lesquels vient s'appuyer une partie déterminée du wagonnet. La figure 93 montre une station terminale en bois de la maison Th. Otto et Cie, dans laquelle la pression du câble est supportée par une contrefiche métallique en treillis.

Lorsque le chemin aérien présente de grandes portées dans lesquelles la flèche varie beaucoup avec la charge, on doit rapprocher davantage les tendeurs et les établir autant que possible près de ces portées.

40. Chariot de roulement des wagonnets. — Le chariot de roulement créé par Pohlig en 1885 et adopté actuellement par presque toutes les maisons, comprend comme parties essentielles deux roues en acier fondu au creuset placées l'une derrière l'autre entre deux plaques de tôle. L'écartement de ces dernières est maintenu constant par les axes des roues ; seuls Ceretti et Tanfani construisent leurs flasques en acier fondu. Toutes les matières autres que l'acier fondu, essayées pour la construction des roues, ont été très vite usées par le roulement sur les câbles spiroïdaux qui sont en acier très dur et ne présentent pas une surface extérieure lisse. Le diamètre des roues dépend de la charge du wagonnet : il varie de 200 à 300 millimètres, on dépasse rarement cette dernière dimension à cause des difficultés de roulement que l'on rencontre alors dans les courbes des stations terminales.

Les roues présentent généralement sur leur pourtour une gorge demi-circulaire, de sorte que le wagonnet ne peut pas quitter le câble, même lorsqu'il oscille sous l'action du vent ou d'autres forces analogues. Comme avec une telle gorge le câble n'appuie que sur une surface très étroite, la firme Th. Otto et Cie avait donné aux roues de ses wagonnets à lourde charge la forme représentée par la figure 94, partageant ainsi la pression sur deux surfaces. Malheureusement cette forme ne se raccorde pas si bien aux câbles que la demi-circonférence ; de plus la pression des roues est beaucoup plus grande qu'avec la forme ordinaire, aussi cette construction ne s'est-elle pas répandue.

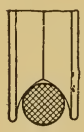


Fig. 94.

Les essieux sont creux et remplis de graisse consistante mélangée souvent à un peu de graphite. Par suite de l'échauffement produit par le frottement,

la graisse fond et sort par des trous de l'axe pour se répandre dans les pattes d'araignées prévues sur la face extérieure (fig. 124). Ces essieux sont généralement construits en bronze dur phosphoreux ; pour diminuer l'usure, dans le cas de grosses charges unitaires, quelques maisons les font en acier coulé. Les axes ne s'usant qu'à la partie inférieure, on double presque leur durée en leur faisant faire un demi-tour au bout d'un certain temps.

Dans l'ancienne construction des chariots de roulement que l'on trouve encore dans les très vieilles installations, les roues tournaient folles sur leurs axes encastrés dans une traverse latérale en fonte. La fatigue de ces axes en porte-à-faux était très grande et le principal inconvénient de cette disposition provenait de la position très inclinée prise par le chariot lorsque le moyeu relativement court était usé.

Le câble porteur étant assez rigide, lorsque le diamètre des roues a été convenablement choisi, on peut admettre comme coefficient du frottement de roulement $f = 0,75$ millimètres. En employant de la graisse consistante comme il est dit plus haut, le coefficient du frottement de glissement des axes μ_0 est d'environ 0,063 avec des wagonnets neufs et, lorsque ceux-ci sont en service depuis quelque temps, cette valeur diminue de moitié. Si nous prenons une roue ordinaire avec un diamètre $D = 250$ millimètres et un axe $d_1 \backsim 35$ millimètres, nous aurons comme résistance au roulement :

$$\mu = \frac{2f + d_1}{D},$$

soit environ $\frac{1}{100}$ pour les wagonnets ayant déjà roulé et environ $\frac{1}{70}$ pour les wagonnets neufs.

Dans le but de diminuer cette résistance, J. Pohlig emploie des paliers à billes qui nécessitent un graissage beaucoup moins intense et donnent un roulement excessivement doux. En employant ces paliers on obtient une résistance $\mu = \frac{1}{150}$, qui est sensiblement la même dans les wagonnets neufs que dans ceux ayant déjà roulé, vu le grand soin avec lequel ces supports sont exécutés. Le prix élevé de ces appareils empêche malheureusement d'en généraliser l'emploi ; dans les grands transporteurs nécessitant une force motrice considérable, le supplément de dé-

pense déterminé par leur emploi est couvert en peu d'années par l'économie de force qu'ils permettent de réaliser. La figure 120 montre un appareil avec paliers à billes construit par la maison Beer S.A. de Jemeppe-lez-Liège.

Comme on ne peut pas augmenter indéfiniment le diamètre des câbles porteurs à cause de la construction des pylônes et des tendeurs, on a admis 500 kilogrammes comme pression maximum d'une roue. Lorsqu'on a des charges plus lourdes à transporter, comme par exemple des troncs d'arbres, des barres de fers... etc., on dispose à une distance convenable l'un de l'autre deux chariots que l'on accouple au câble tracteur.

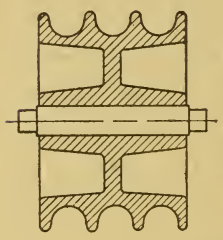


Fig. 95.

Si la matière doit être contenue dans une caisse, il suffit d'augmenter le nombre de roues du chariot. Ceretti et Tanfani ont déjà construit des wagonnets avec 8 roues reliées deux par deux au moyen de balanciers afin de

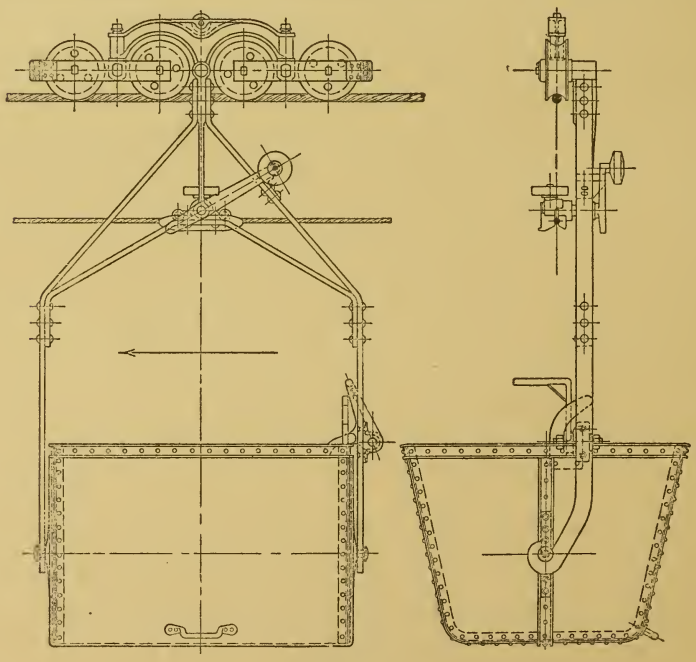


Fig. 96.

répartir également la pression (fig. 191). Un tel chariot offre une cer-

taine longueur et ne peut circuler dans les courbes ; aussi n'est-il employé que dans les transporteurs aériens à va-et-vient.

Pour éviter cet inconvénient, J. Pohlig A.G. a employé quelquefois deux roues analogues à celle de la figure 95. La voie des wagonnets pleins était formée par deux câbles parallèles sur lesquels venaient se poser les deux gorges extrêmes, tandis que le chariot reposait par la gorge milieu sur le câble des wagonnets vides et sur les voies suspendues des stations. L'inconvénient de cette disposition est d'augmenter considérablement les frais d'établissement de l'installation par suite de l'emploi d'un double câble porteur ; aussi est-on revenu aux galets à gorge unique placés l'un derrière l'autre. Pour le transport des lourds wagonnets de mine, Ad. Bleichert emploie depuis longtemps un dispositif qui consiste à suspendre la benne à deux chariots distincts réunis d'une façon non rigide par des cornières, un seul de ces chariots s'accrochant au câble tracteur.

La figure 96 montre un wagonnet à quatre roues construit par la maison J. Pohlig : l'appareil est formé de deux chariots placés l'un devant l'autre et réunis par des axes et des leviers disposés au-dessus des galets. Le principe du wagonnet à lourdes charges de Ad. Bleichert et Cie représenté par la figure 97 est le même que celui du précédent, mais la liaison des chariots au lieu de se faire en-dessus, se fait à la partie inférieure au moyen d'un étrier et de joints à la cardan. En comparant ces deux wagonnets, on voit que le premier permet d'utiliser une suspension ordinaire tandis que le second emploie une suspension spéciale, mais nécessite en revanche moins d'encombrement dans le sens de la hauteur.

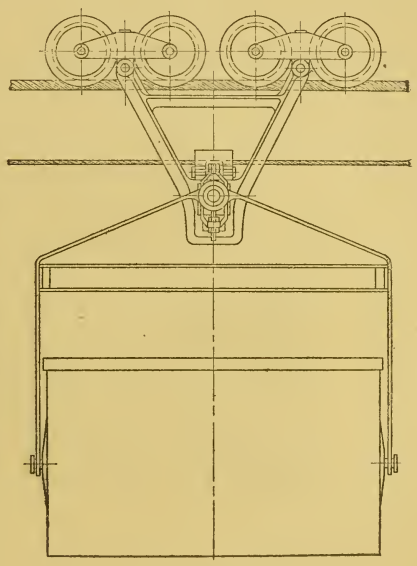


Fig. 97.

Pour les voies suspendues qui ne sont pas réunies à un transporteur à traction par câble, on emploie avantageusement des chariots de roule-

ment à quatre galets roulant sur les ailes inférieures d'un fer I (voir fig. 106). On peut ainsi employer des fers I très forts nécessitant beaucoup moins de supports que les légers rails suspendus ordinaires.

41. Suspensions des wagonnets. — Entre les roues du chariot se trouve un axe auquel est fixée la suspension, de telle sorte que le wagon-

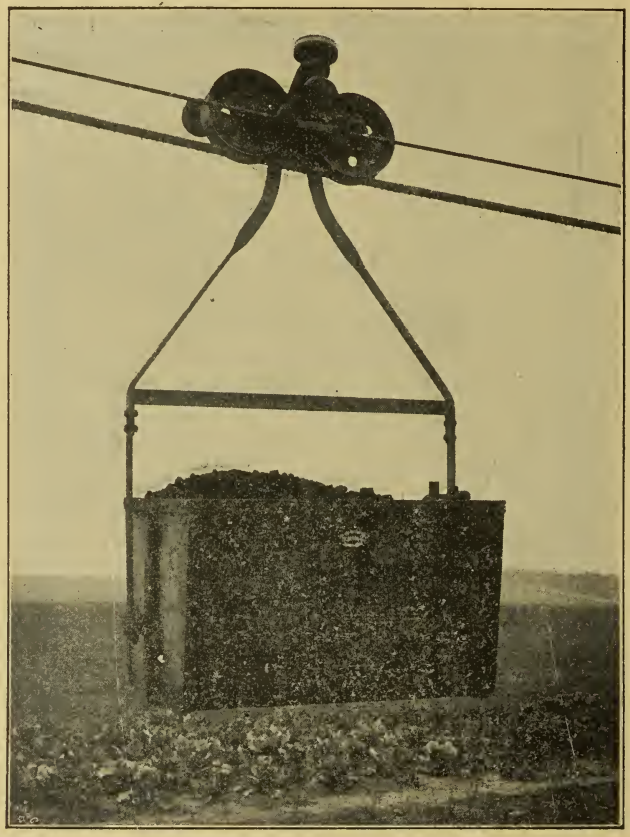


Fig. 98.

net peut osciller librement dans le sens des voies de roulement. La forme de la suspension varie beaucoup avec le but que doit remplir le wagonnet et le mode d'accouplement de celui-ci au câble tracteur. Il existe de ce fait un grand nombre de formes de suspensions, lesquelles

sont cependant toutes constituées par de solides fers plats, comme le montrent les figures ci-après.

On ne se départit en général de cette règle que lorsqu'on est limité comme encombrement dans le sens de la hauteur ; la figure 101 représente un wagonnet de 8 hectolitres construit par la « Deutsche Maschinenfabrik », section de Benrath, dans lequel la suspension est formée par deux fers profilés cintrés et rivés ensemble.

Lorsque l'appareil d'accouplement est fixé à la suspension même, celle-ci doit être suffisamment résistante pour pouvoir transmettre la tension du câble tracteur aux roues, et cela particulièrement au passage

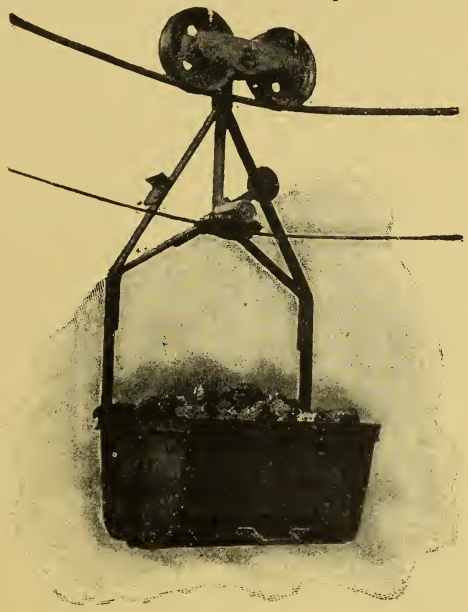


Fig. 99

des élévations de terrain. Les figures 98 et 99 montrent clairement la différence entre les deux constructions de la maison Th. Otto et Cie. Dans le second système la suspension porte l'appareil d'accouplement, tandis que dans le premier, construit avec caisse pour lourdes charges, le dispositif d'accrochage se trouve dans le chariot. Les fers plats de la suspension représentée par la figure 98 sont tordus à la partie supérieure pour permettre de traverser les aiguilles Krempler qui n'offrent qu'un passage très étroit.

42. Caisse des wagonnets. — La plupart du temps, les matières à transporter telles que charbon, minerais, pierres, etc., sont en morceaux que l'on renferme dans des caisses parallèlipipèdiques en tôle, aux deux extrémités desquelles sont rivés des tourillons qui viennent se placer dans les parties inférieures de la suspension en forme de crochets. Pour empêcher la caisse de culbuter, on la munit d'une pièce articulée en forme d'U qui vient saisir la suspension (fig. 99), de sorte que lorsque cette pièce a été rabattue vers l'intérieur, la caisse suspendue au-dessous de son centre de gravité peut se renverser librement. Dans

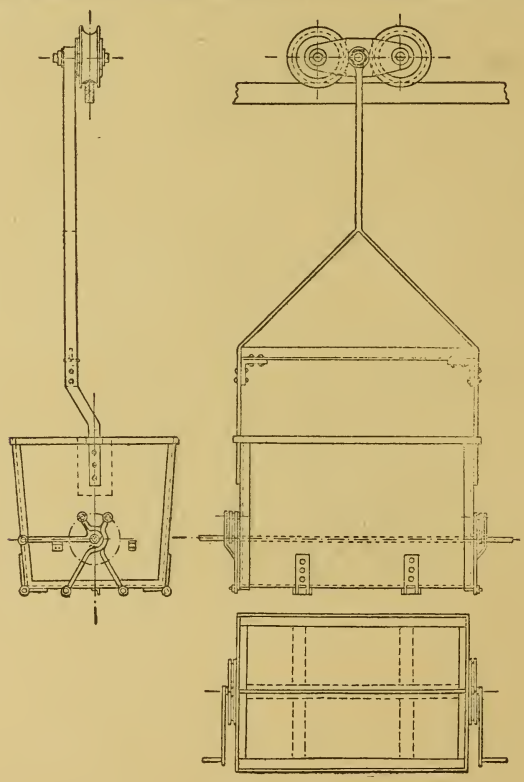


Fig. 100.

d'autres cas, l'arrêt se fait par un doigt articulé sur la suspension qui vient se placer dans une fourche fixée sur la caisse. En munissant la pièce articulée, fourche ou doigt, d'un levier coudé approprié pouvant rencontrer un appareil culbuteur, il est possible de renverser la caisse

automatiquement. Pour permettre de ramener facilement la caisse dans sa position normale, on la munit sur le coté d'une griffe.

Dans ses wagonnets de voies suspendues, la Deutsche Maschinenfabrik A.-G. réunit souvent d'une façon fixe la suspension à la caisse, et le vidage s'opère par le fond au moyen de deux portes s'ouvrant dans le sens longitudinal (fig. 100). Ces dernières peuvent s'ouvrir ou se fermer par la manœuvre d'un levier à main placé sur le côté. Dans le cas de lourdes charges, la même maison emploie un autre dispositif pour

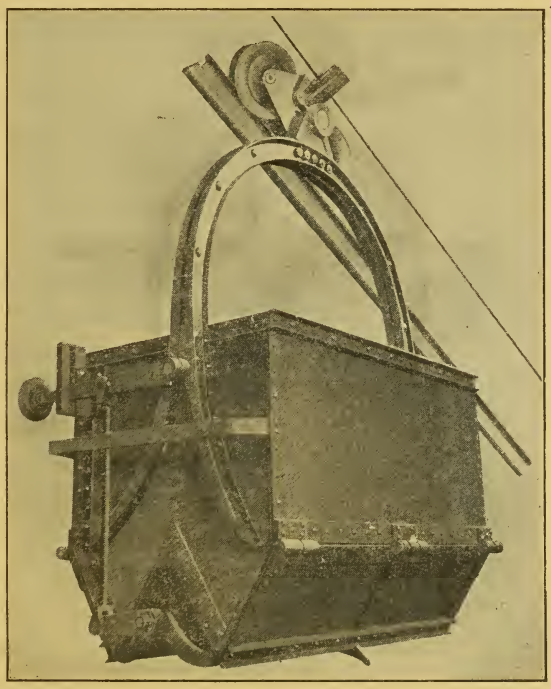


Fig. 101.

vider automatiquement ses wagonnets (fig. 101); le fond de la caisse possède deux portes inclinées articulées qui sont commandées au moyen d'un petit galet latéral par l'intermédiaire de leviers. L'ouverture s'effectue lorsque le galet est soulevé et la fermeture s'opère à la main par une simple poussée.

Toutes les maisons s'occupant de transporteurs aériens construisent

des caisses appropriées au transport de matières pulvérulentes, de marchandises devant rester à l'abri des intempéries, de sacs, de barils, etc. Les caisses et les balles sont transportées sur des plateformes qui varient beaucoup comme structure. La figure 66 nous a déjà montré une forme simple de ce genre de construction pour le transport de grosses balles. La figure 102 représente un wagonnet avec plateforme destiné au transport de caisses, tandis que la figure 103 montre un wagonnet avec cage pour le transport de morceaux de bois.

Lorsqu'on doit transporter de gros troncs d'arbres, des barres de fer

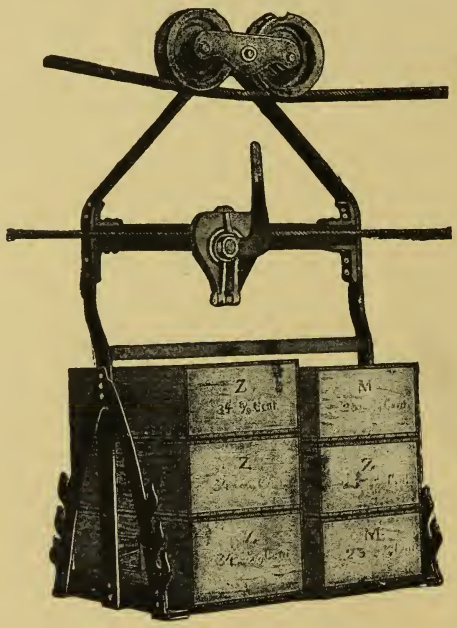


Fig. 102.

ou d'autres marchandises de ce genre, on dispose deux chariots à une faible distance l'un de l'autre et on termine les suspensions par un grand crochet articulé ou par une chaîne permettant d'attacher les arbres comme le montre la figure 104, d'après une construction de la Deutsche Maschinenfabrik A.-G. La plupart des figures précédentes représentent des wagonnets construits par Ad. Bleichert et C° ou par J. Pohlig A.-G. On munit souvent le chariot d'un anneau pour pouvoir suspendre le wagonnet au crochet d'une grue et opérer plus facilement le

chargement ou le déchargement. Dans certains cas, on relie la caisse à la suspension par une chaîne ; un palan fixé à la suspension permet

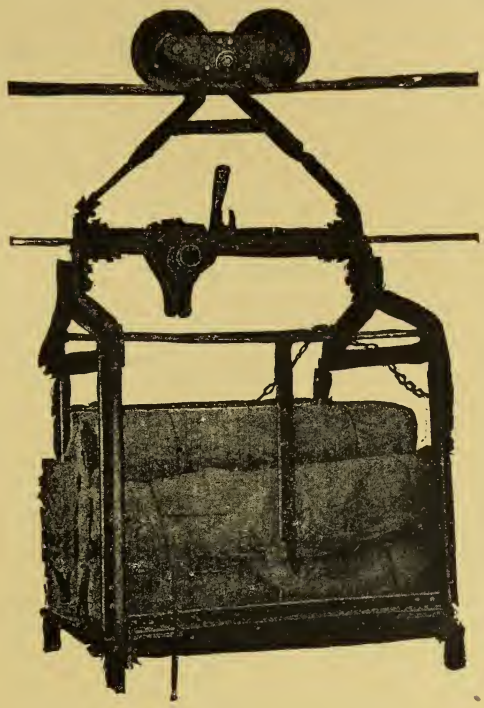


Fig. 103.

de descendre ou de monter la caisse. La figure 105 montre un système de wagonnet construit par Carstens et Fabian à Magdebourg ; la caisse

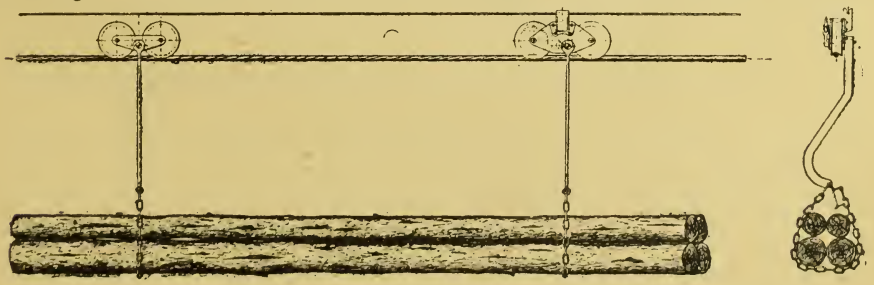


Fig. 104.

est suspendue à deux câbles qui viennent s'enrouler sur deux tambours supportés par un cadre de la suspension. Sur l'axe des tambours est calée

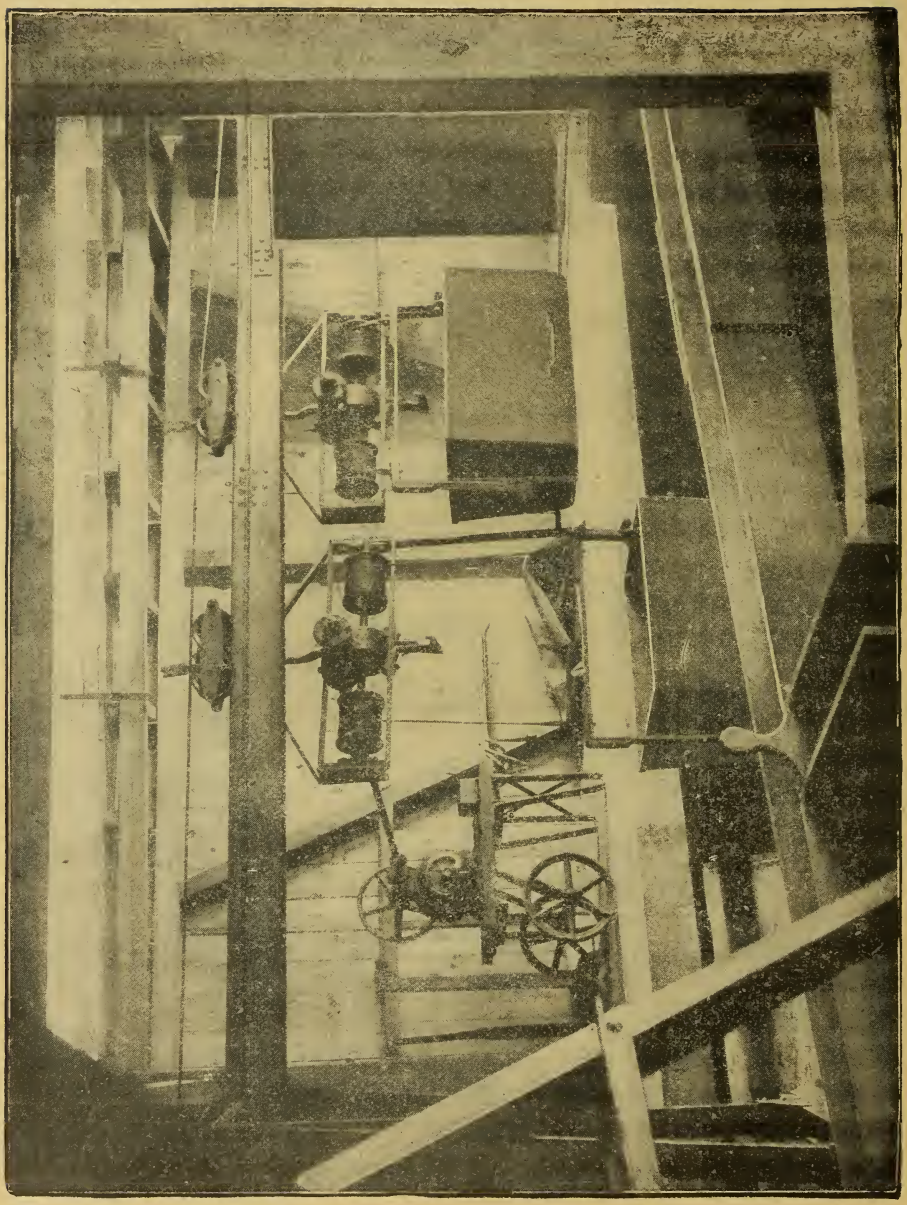


Fig. 105.

une roue dentée commandée par une vis sans fin accouplée directement à l'arbre d'un moteur électrique. Pour plus de sécurité, on a encore disposé un crochet au-dessous de la traverse de la suspension.

Dans ces wagonnets avec mouvements de montée et de descente, la caisse n'est pas guidée et peut osciller d'un côté ou de l'autre. Pour obvier à cet inconvénient, la maison Beck et Henkel prévoit comme dispositif de guidage une suspension avec parallélogrammes articulés (fig. 106). Les points d'attache de ces derniers au chariot sont suffisamment éloignés pour empêcher les oscillations de la caisse dans le sens du mouvement ([1]). Les parallèlogrammes sont formés par de légers fers plats qui augmentent très peu le poids mort du wagonnet ; pour une course initiale de $3^{m},50$, cette augmentation est d'environ 30 kilogrammes.

Le poids de la charge utile des wagonnets spéciaux est ordinairement déterminé par la nature même des matières à transporter. Lorsqu'on a des wagonnets avec caisse, le choix de la contenance de cette dernière dépend du débit de l'installation et de la disposition des stations terminales. En général, on choisit les intervalles de façon à ne pas avoir dans chaque station plus de deux manœuvres pour recevoir, pousser, vider et raccrocher les wagonnets. Cette condition correspond à un intervalle d'environ 25 à 35 secondes. Afin d'utiliser avantageusement la force des ouvriers, on ne doit pas descendre autant que possible au-dessous de 300 kilogrammes comme charge utile. D'un autre côté, il ne faut pas non plus choisir des wagonnets trop lourds, car on serait conduit à prendre des câbles porteurs de grand diamètre et par suite coûteux.

Les données précédentes se rapportent à des transporteurs ayant un débit horaire de 40 à 60 tonnes et à des chariots de construction courante. Avec des galets munis de roulement à billes, on peut augmenter considérablement le poids de la charge utile, vu le faible frottement des chariots ainsi construits.

Le poids d'une caisse de wagonnets de $1^{hl},5$ est d'environ 45 kilogrammes, tandis que la suspension correspondante, en construction légère, pèse 25 kilogrammes. Une caisse de 5 hectolitres en tôle moyenne de 3 millimètres pèse 100 kilogrammes, et la suspension selon le mode d'accouplement de 35 à 45 kilogrammes. Une caisse culbutable de

---

([1]) G. v. Hanffstengel : *Neuerungen im Bau von Transportanlagen in Deutschland. Dinglers polytechn.* Journal 1906, page 374.

8 hectolitres de contenance pèse environ 160 kilogrammes; celle de la

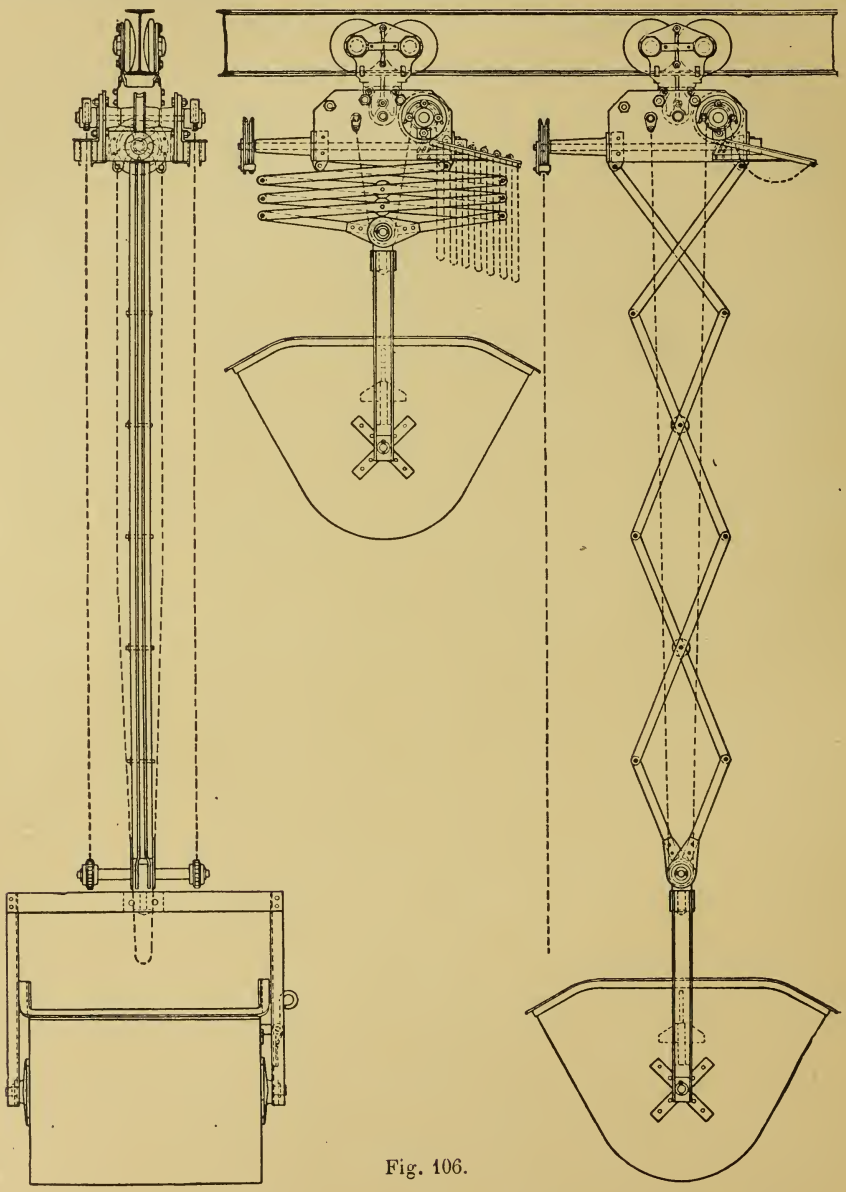


Fig. 106.

figure 96 a un poids de 190 kilogrammes et la suspension pèse 60 kilogrammes.

A ces poids on doit encore ajouter ceux du chariot et de l'appareil d'accouplement qui atteignent ensemble selon le genre de construction 70 à 90 kilogrammes.

13. Appareils d'accouplement. — La liaison des wagonnets au câble tracteur s'effectue à l'heure actuelle presque exclusivement au moyen de mâchoires d'accouplement, et les appareils existants ne diffèrent les uns des autres que par la façon dont les mâchoires sont pressées contre le câble.

Dans les fortes rampes, les premiers appareils d'accouplement à mâchoires n'agissaient pas d'une façon sûre, car leur pression sur le câble

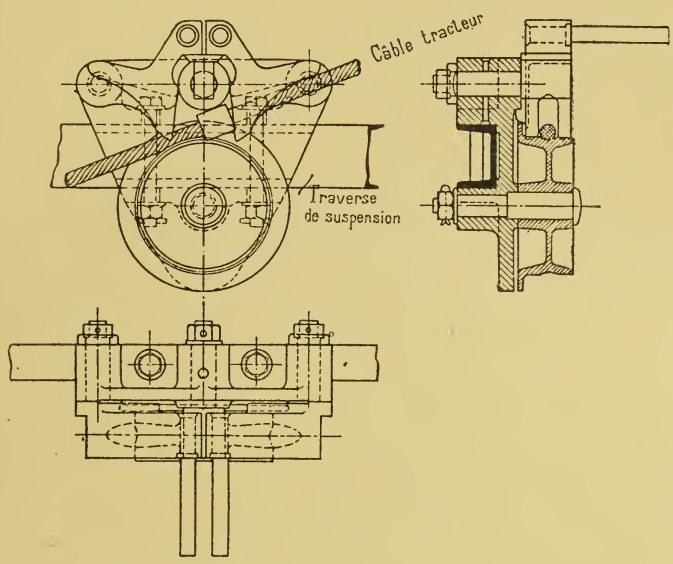


Fig. 107.

était trop faible et très variable. Pour cette raison, dans les installations ayant des rampes d'une inclinaison supérieure à $\frac{1}{4}$, on munissait le câble de nœuds ou manchons placés à une distance déterminée les uns des autres et venant se poser dans un évidement formé par des mâchoires fixées à la suspension.

Comme type de cette catégorie, nous allons décrire l'appareil à cliquets

d'Otto qui était autrefois très employé et dont la simplicité est caractéristique. Il se compose de deux cliquets articulés en forme de fourche, disposés symétriquement au-dessus d'un galet en acier guidant le câble tracteur (fig. 107).

Ces deux cliquets portent chacun à leur partie supérieure une tige qui, aux endroits de désaccouplement, vient passer sur des rails de décrochage de forme appropriée.

Pour l'accrochage, le manchon lève le premier cliquet, s'accroche au second et entraîne ainsi le wagonnet.

Par suite des perfectionnements apportés aux accouplements à mâchoires, on a actuellement tout à fait abandonné les appareils qui nécessitent un câble tracteur muni de douilles. Ceux-ci offraient deux inconvé-

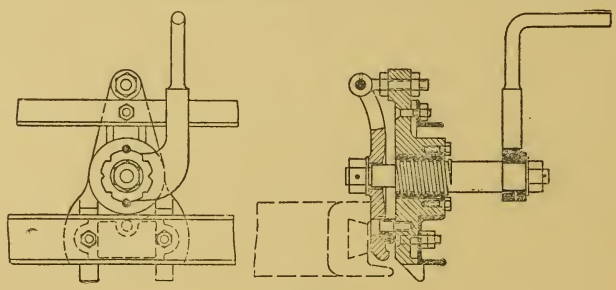


Fig 108.

nients : les manchons du câble tracteur étant fixes, il n'était pas possible d'augmenter à certains moments le débit de l'installation et on ne pouvait pas graisser et inspecter le câble aux points d'accrochage où il était très facilement attaqué par la rouille.

La figure 108 représente le vieil appareil d'accouplement à vis d'Otto, encore parfois employé à cause de sa grande simplicité et de son bon marché. Tel qu'il est construit actuellement, il se compose de deux disques : l'un fixé à la traverse de la suspension du wagonnet et l'autre articulé autour d'un axe prenant appui à la partie supérieure du premier ; l'écartement des deux disques est déterminé par le diamètre du câble. Le moyeu du premier forme un écrou à filet carré, dans lequel tourne une tige munie d'un levier rapprochant le disque mobile du fixe en serrant fortement le câble qui pénètre par dessous. Cet appareil doit être commandé à la main en tournant le levier calé sur la vis

d'accouplement. Comme le montre la figure 108, la mâchoire placée sur le côté extérieur de la suspension peut venir s'appliquer contre des poulies à câbles qui inclinent le wagonnet.

La figure 109 montre un appareil employé autrefois par Ad. Bleichert et C°, dans lequel une mâchoire mobile est appliquée contre une mâchoire fixe au moyen d'un excentrique. Une poulie folle R avec graisseur à graisse consistante S est montée sur la partie inférieure du bâti K fixé entre deux barres transversales de la suspension du wagonnet. Un excentrique articulé sur l'axe du levier H, à l'intérieur du bâti, appuie le segment E contre le câble lorsque le levier est soulevé. La position de la poulie R par rapport au segment E est réglée d'après le diamè-

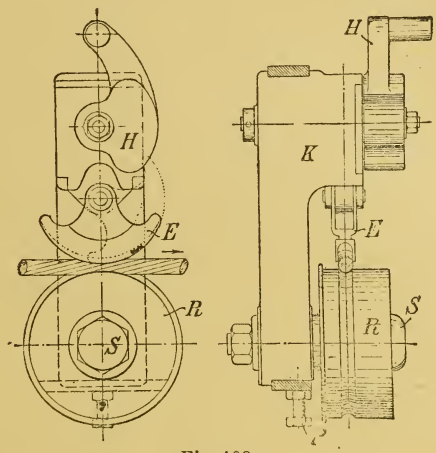


Fig. 109.

tre du câble au moyen de la vis P. L'accrochage et le décrochage s'effectuent comme dans l'appareil d'Otto. Lorsque dans une pente l'appareil tend à glisser et à descendre, le segment E en forme d'excentrique tourne légèrement d'un côté ou de l'autre ; la pression ainsi exercée sur le câble tracteur correspond à l'inclinaison de la rampe sur laquelle se trouve le wagonnet. Dans cet appareil abandonné par Bleichert depuis déjà plus de 10 ans, la surface sur laquelle agissait la pression était très petite et le câble travaillait par suite dans de mauvaises conditions.

Dans ces deux derniers appareils, la pression de l'accouplement dépend des ouvriers et la sécurité du fonctionnement n'est pas complète ; aussi

ne les emploie-t-on que lorsqu'on n'a pas de pentes supérieures à $\frac{1}{4}$. Pour avoir plus de sécurité, on avait soin de ne pas éloigner beaucoup le pre-

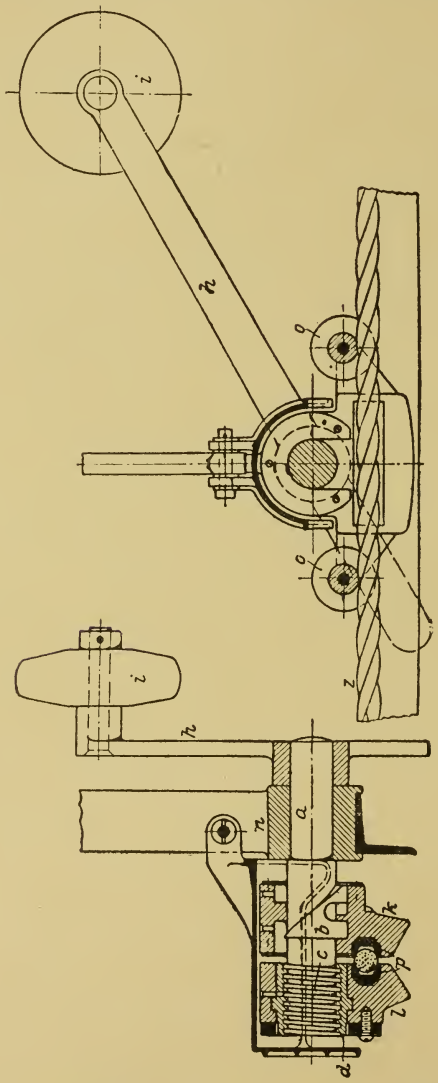


Fig. 110.

mier pylône de la station et de le prévoir un peu plus haut que l'accrochage, de sorte qu'un wagonnet mal accouplé se décrochait dans la première portée pour revenir tout doucement à la station.

Le perfectionnement apporté en 1885 par Werner à l'appareil d'accouplement d'Obach fut un grand progrès dans ce genre de construction ; il fut d'abord construit par J. Pohlig et adopté plus tard par plusieurs autres maisons. La figure 110 représente le dernier modèle exécuté par la maison J. Pohlig. Une tige *a* tournant dans un palier *n* de la suspension du wagonnet, porte à l'une de ses extrémités un levier culbuteur *h* avec galet-contrepoids *i* et présente à l'autre une courte surface hélicoïdale ou filetage à droite *b* dont l'inclinaison est très grande, avec un filetage à gauche *c* de pas beaucoup plus petit. Lorsque le galet *i* rencontre une pièce de butée, le levier fait tourner la tige *a* et les deux mâchoires *l* et *k* sont vissées fortement l'une contre l'autre en serrant le câble tracteur *z*. Le filetage à droite *b* qui n'a qu'un demi-pas environ amène rapidement la mâchoire *k* en contact avec le câble grâce à sa

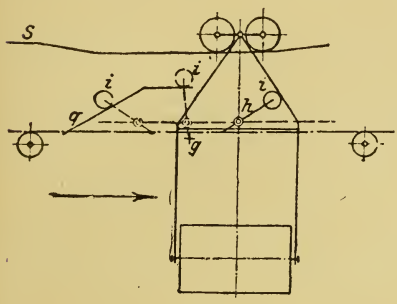


Fig. 111.

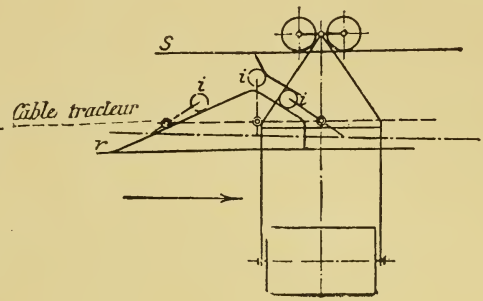


Fig. 112.

grande inclinaison. Cette mâchoire vient ainsi dans une position telle que lorsqu'elle touche le câble, le filetage à droite est à fond de course, et la tige continuant à tourner, le filetage à pas fin *c* appuie lentement mais avec une grande force la mâchoire *l* contre le câble.

Les mâchoires sont en acier coulé et munies de garnitures démontables en bronze *p* pour protéger le câble. Le graissage des filetages est effectué au moyen de trous et de graisseurs placés à la partie supérieure des mâchoires. Le dispositif entier est protégé contre la neige et la pluie par un capot amovible en fonte.

L'accouplement s'effectue automatiquement et à l'endroit où il a lieu le rail de roulement *s* est cintré vers le bas d'environ 9 centimètres

(fig. 111) ; le câble tracteur est guidé et maintenu entre les mâchoires ouvertes par les galets *o*. Le wagonnet est alors poussé plus loin dans le sens du mouvement, et le galet-contrepoids *i* du levier tourné vers l'arrière vient rouler sur le rail-guide *q* qui monte d'abord pour devenir ensuite horizontal. Le levier est ainsi amené dans une position voisine de la verticale ; sa partie inférieure vient buter contre la traverse *g* de sorte que dans sa position finale il retombe vers l'avant. Comme le wagonnet prend à peu près la vitesse du câble dans la partie inclinée du rail, l'accouplement s'effectue sans secousses.

A l'endroit du décrochage, le galet *i* roule d'abord sur le rail-guide montant *h* (fig. 112), pour être ensuite ramené vers l'arrière par un deuxième rail lorsque le levier a atteint sa position verticale. Afin que le contrepoids *i* retombe sans chocs, la deuxième partie du rail *r* guide le galet *i* en dessous.

Ces guidages du galet-contrepoids doivent être montés avec beaucoup de soins, aussi ne les fixe-t-on pas directement aux charpentes en bois des stations, mais à une construction spéciale en fer. La figure 113 montre l'ensemble d'une telle disposition d'après Carstens et Fabian de Magdebourg.

Cette maison construit l'appareil qui vient d'être décrit, d'une façon plus simple (fig. 114) : elle ne prévoit sur la tige qu'un filetage d'inclinaison moyenne qui agit directement sur la mâchoire mobile articulée autour d'un axe monté dans la mâchoire fixe. Par suite de l'action directe de la tige filetée sur la mâchoire mobile, celle-ci supporte un effort dirigé normalement suivant son axe. L'écrou de la tige filetée est relié à la mâchoire fixe et articulé sur la suspension, pour permettre à l'appareil entier de prendre les inclinaisons de la voie dans le sens du câble tracteur.

La figure 115 représente l'appareil d'Obach modifié, construit autrefois par la maison Orenstein et Koppel de Berlin. Sur l'arbre *a* sont calés deux disques *b* et *c* présentant chacun une rainure excentrée par rapport à l'axe de l'arbre ; dans ces évidements se déplacent deux tenons *d* et *e* qui sont reliés aux mâchoires d'accouplement *h* et *i* par l'intermédiaire des leviers *f* et *g*. Les mâchoires sont suspendues à l'axe d'articulation *k*. Si on fait tourner l'arbre *a* dans la suspension *l* du wagonnet, on amène

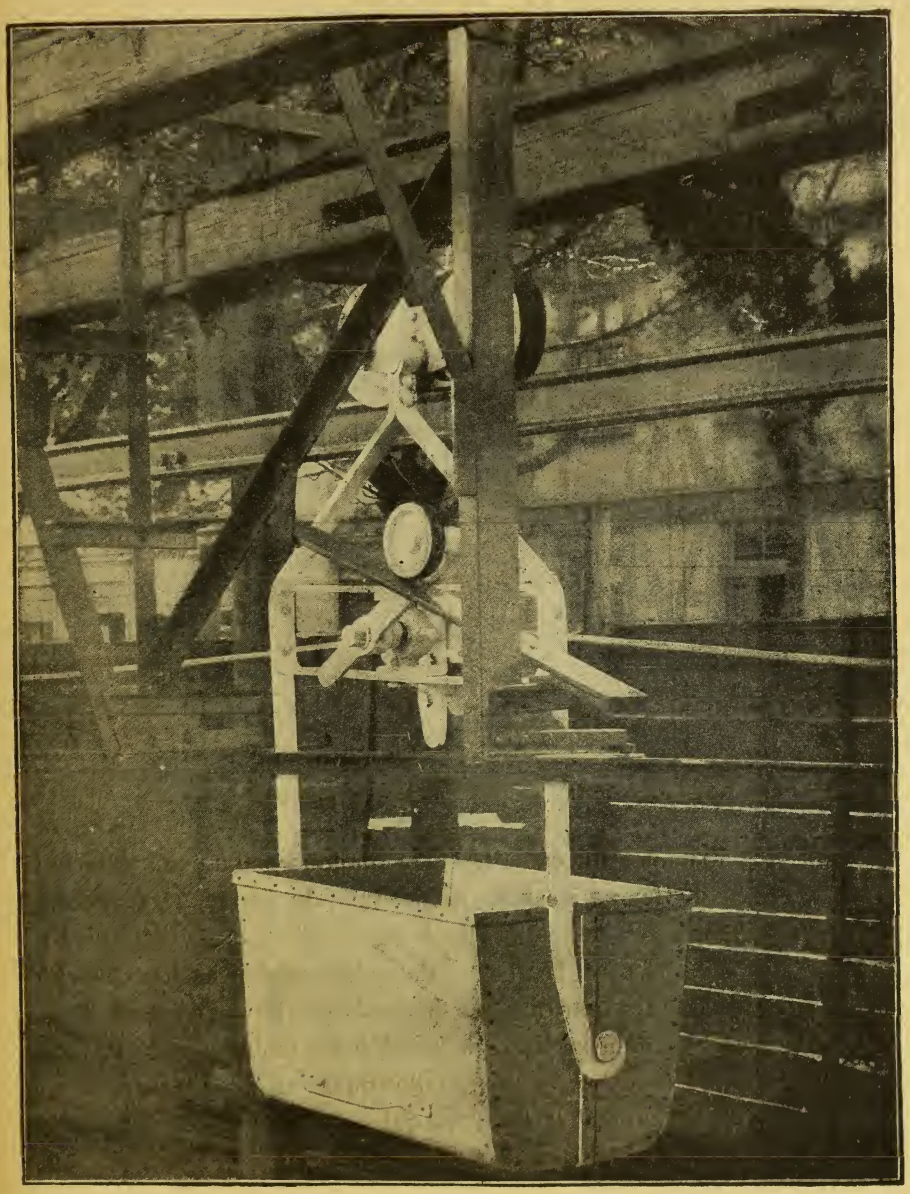


Fig. 113.

les deux pièces *d* et *e* dans leur position inférieure représentée par la figure 115, en même temps que les leviers *f* et *g* se rapprochent de l'horizontale en poussant les deux mâchoires l'une contre l'autre. Dans cet appareil la vis est remplacée par des leviers articulés.

Dans ces différents appareils, la course maximum du levier portant le contre-poids est de chaque côté de 60 à 70°. Sous l'action de la pression des mâchoires, les torons sont poussés vers l'intérieur dans l'âme en

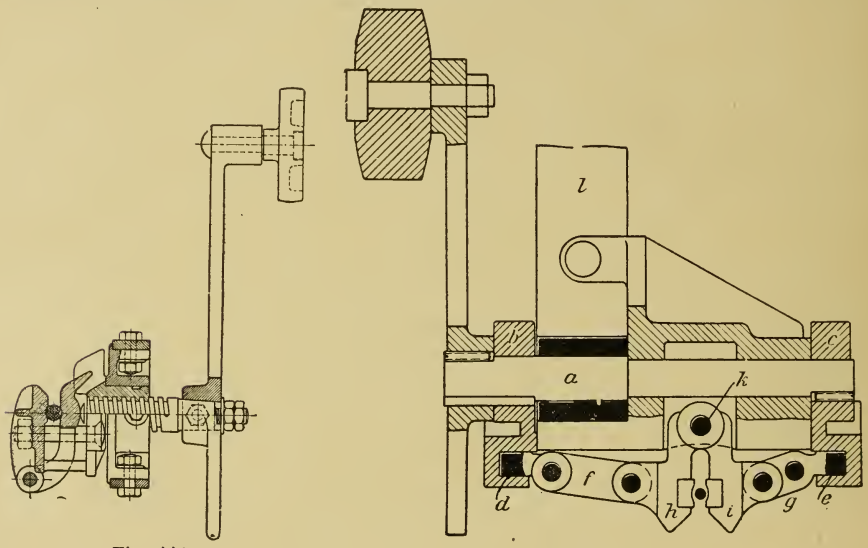


Fig. 114. Fig. 115.

chanvre et le diamètre du câble tracteur diminue peu à peu, obligeant ainsi à régler de temps à autre la position du levier *h*. J. Pohlig obtient un réglage facile en fixant le levier *h* d'une façon définitive à l'arbre *a* et en poussant l'écrou *d* dans les mâchoires *l* au fur et à mesure que le câble tracteur diminue de diamètre. Dans l'appareil de la Benrather Maschinenfabrik, l'axe de la mâchoire mobile monté dans la mâchoire fixe est excentré, et pour éviter qu'il tourne de lui-même, sa tête porte un certain nombre de faces qui appuient contre un bossage d'arrêt (fig. 116). Le déplacement de la mâchoire est alors égal à la double excentricité de l'axe.

Avec les appareils qui viennent d'être décrits, il n'est pas possible de rouler sur des courbes horizontales sans quitter le câble tracteur.

Pour obvier à cet inconvénient, Pohlig et Otto ont monté leurs appareils d'accouplement universel dans le chariot au lieu de les adapter à la suspension (fig. 117), utilisant ainsi l'axe d'articulation de la suspension comme tige filetée. Ces deux appareils ont à peu de chose près une disposition identique à celle représentée par la figure 110. Pour empêcher le wagonnet d'osciller dans les courbes sous l'action de la force centrifuge, le chariot de roulement porte à sa partie supérieure un rouleau-guide qui vient appuyer contre des rails cintrés appropriés. Cet appareil présente encore l'inconvénient de ne permettre le passage des courbes que dans un sens.

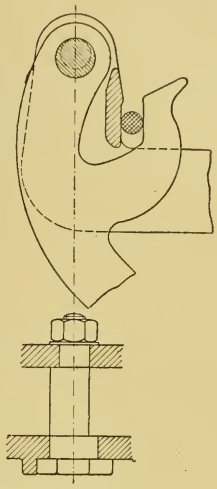


Fig. 116.

Pour effectuer le passage dans les deux sens, Carstens et Fabian ont donné à la mâchoire d'accouplement mobile la forme d'un levier double (fig. 118), dont l'extrémité inférieure est commandée de la façon ordinaire. Pour le réglage d'après le diamètre du câble, ils ont prévu un boulon de fixation maintenu en place par une plaque de sûreté.

R. White et Sons ont donné à leur accouplement à vis une forme ana-

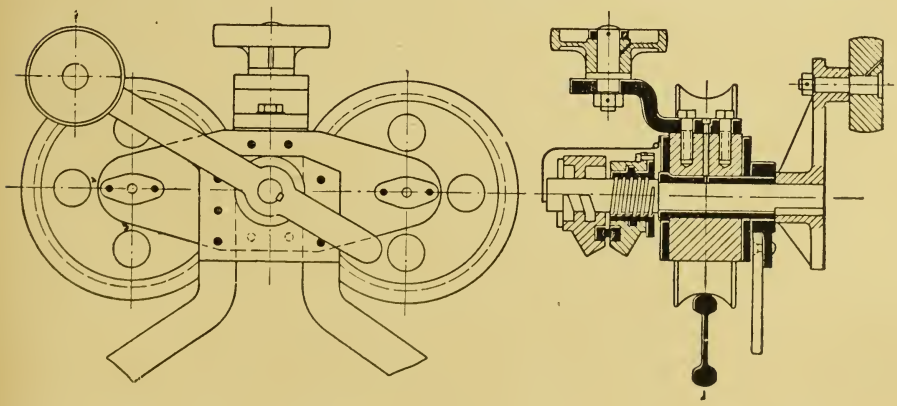


Fig. 117.

logue à la précédente (fig. 119). Sur le côté du chariot de roulement ou de la suspension et perpendiculairement à la voie de roulement, se trouve articulé un levier *a* qui présente une ouverture *b* semblable à celle d'une

clé anglaise dans laquelle le câble vient se poser latéralement. Une tige *d* filetée à sa partie inférieure porte en haut une roue étoilée *c* qui vient en contact avec une série de dents à l'endroit de l'accouplement et l'appareil est guidé par le galet *e* en même temps que la mâchoire *f* presse le câble sous l'action de la rotation de *d*. Par suite de la forme spéciale de l'ouverture *b*, l'appareil peut contourner les poulies-guide en s'appuyant par trois de ses côtés. Lorsque les wagonnets doivent être

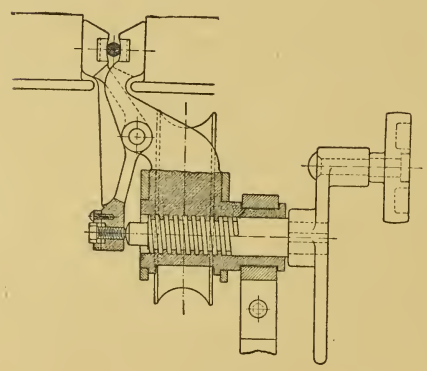


Fig. 118.

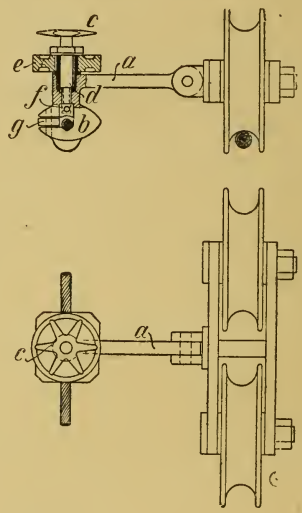


Fig. 119.

chargés ou vidés dans les stations, il n'est pas nécessaire de sortir le câble tracteur qui est maintenu entre les mâchoires par le galet *g*.

L'appareil d'accouplement à vis d'Obach, qui s'est toujours bien comporté dans ses différentes applications, présente cependant un point faible, car il exerce sur des câbles tracteurs de même diamètre une pression constante quelle que soit la charge du wagonnet. Lorsque par l'usage le diamètre du câble tracteur diminue, la compression exercée par l'appareil diminue également, et celui-ci doit être réglé de temps en temps. En 1894, Spitzeck prit un brevet pour un appareil dans lequel il utilisait le poids de la charge suspendue pour effectuer la fixation du wagonnet au câble tracteur. La maison Beer S. A. construit encore actuellement un appareil basé simplement sur ce principe qu'elle emploie dans les chemins aériens à faibles pentes. Le bâti de cet appareil (fig. 120) est

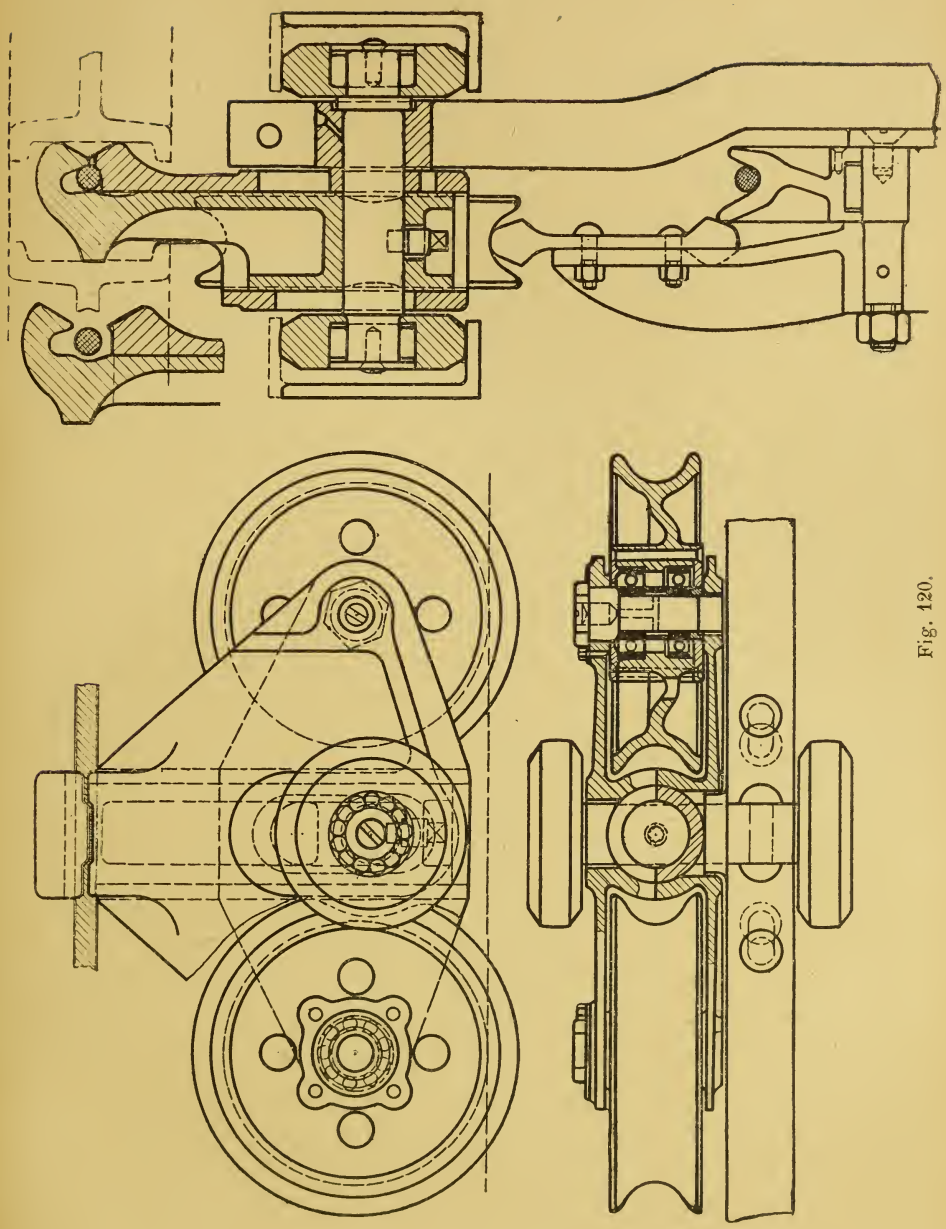


Fig. 120.

en acier coulé et l'une de ses faces latérales se prolonge vers le haut pour former le siège du câble tracteur ; ce dernier est appuyé par un coulisseau central à la partie inférieure duquel est monté un axe fixe portant la suspension de la caisse et à chaque extrémité un galet d'accouplement avec roulement à billes.

La maison Ad. Bleichert et Cie a lancé en 1895 son appareil « Automate » qu'elle a très peu modifié depuis ce temps-là et qui est basé sur le principe de Spitzeck. La pression d'accouplement de cet appareil est beaucoup plus grande que celle du précédent, car le poids de la charge est transmis sur le câble par un levier articulé à bras inégaux (fig. 121). La suspension G du wagonnet est supportée par l'axe M monté dans le

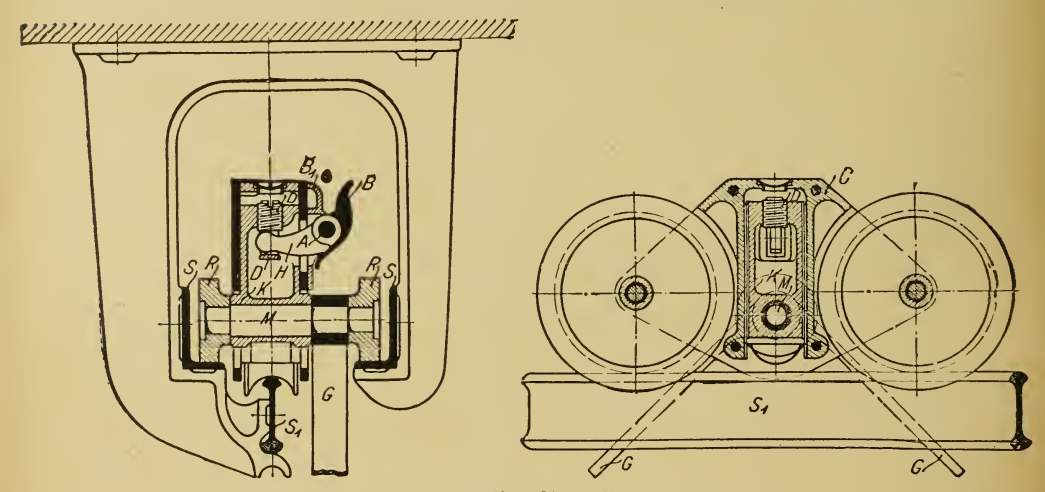


Fig. 121.

coulisseau en fonte K, lequel peut se déplacer verticalement dans une traverse formée par les deux flasques du chariot et la pièce centrale *c*. Une tige d'entraînement D vissée dans la partie supérieure du coulisseau K agit sur le bras intérieur du levier H articulé autour de l'axe A. Lorsque le coulisseau descend, le bras extérieur B du levier appuie le câble tracteur contre la mâchoire fixe B_1. Aux endroits d'accrochage et de décrochage, les galets R disposés sur l'axe de la suspension viennent rouler sur les rails d'accouplement S, lesquels montent légèrement, tandis que les roues du wagonnet restent sur les rails suspendu

S_1 : le coulisseau K est ainsi amené dans sa position supérieure en ouvrant la pince d'accouplement.

Le guidage du câble tracteur à l'accrochage ainsi que l'agencement des rails de roulement et d'accouplement sont indiqués par la figure 122. Le rail de roulement baisse de U en V, est horizontal de V jusqu'en W, et remonte ensuite en pente douce. Le rail d'accouplement S reste d'abord horizontal et baisse à partir de W. Par suite de cette disposition, la pince

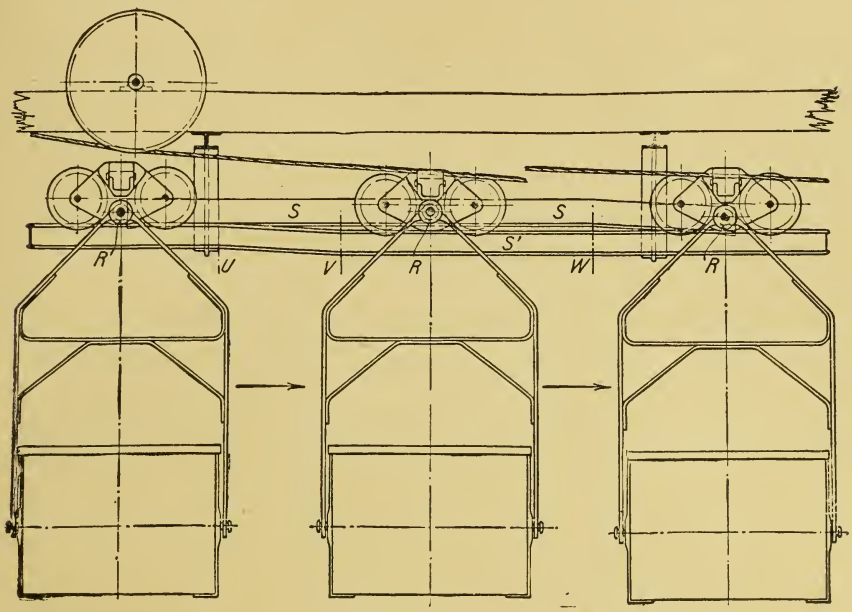


Fig. 122.

est complètement ouverte sur le tronçon VW et le câble tracteur pénètre dedans ; en W la pince commence à se refermer lentement, de sorte que l'accrochage a lieu sans secousses. Au décrochage les mêmes opérations se répètent, mais en sens inverse (fig. 123) : le rail S monte de X en Y, déterminant ainsi l'écartement des mâchoires, sur la partie YZ, le câble tracteur sort et, sur la partie descendante du rail S, la pince se referme lentement.

On doit remarquer que la charge n'est pas soulevée tant que le wagonnet est poussé à la main. Le rapport des bras de levier est tel que la pression exercée sur la mâchoire mobile est égale à environ

deux fois et demie le poids de la suspension et de la caisse de wagonnet. L'encombrement de ce dispositif est tellement réduit que le câble tracteur ne se trouve qu'à 8 centimètres de l'axe du câble porteur lorsque l'appareil d'accouplement est monté sur le chariot comme l'indiquent les figures (121 à 123). Dans les chemins aériens avec pentes très raides, Ad. Bleichert et Cie disposent l'accouplement en-dessous du câble porteur, en prolongeant une des flasques du chariot ; le coulisseau commande

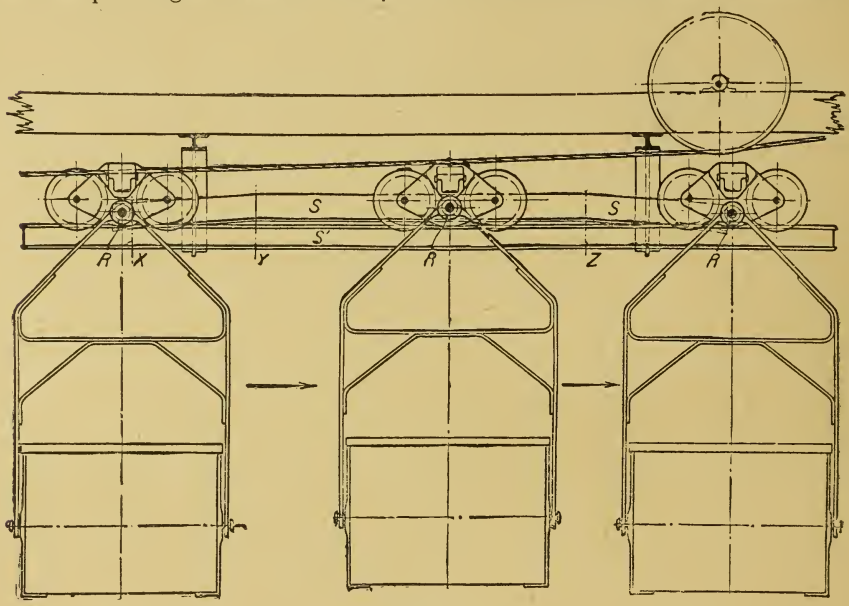


Fig. 123

alors le levier articulé au moyen d'une tige. Dans ce cas le câble tracteur ne se trouve, vu en plan, qu'à 5 millimètres du câble porteur.

Ces appareils ne détériorent pas les câbles tracteurs comme les précédents et ne nécessitent pas de réglage ; aussi les bons résultats obtenus par Bleichert ont décidé un certain nombre d'autres constructeurs à se servir d'appareils basés sur le même principe, c'est-à-dire fonctionnant sous l'action du poids du wagonnet et de sa charge.

La maison Ceretti et Tanfani construit deux types d'appareils : l'un à vis dit « Standard », l'autre à mâchoires actionné par le poids du wagonnet dit « Idéal ».

Ce dernier (fig. 124) comprend quatre parties principales :

1° Un coulisseau A présentant à sa partie inférieure quatre surfaces de glissement et un trou pour le passage de la suspension. A la partie

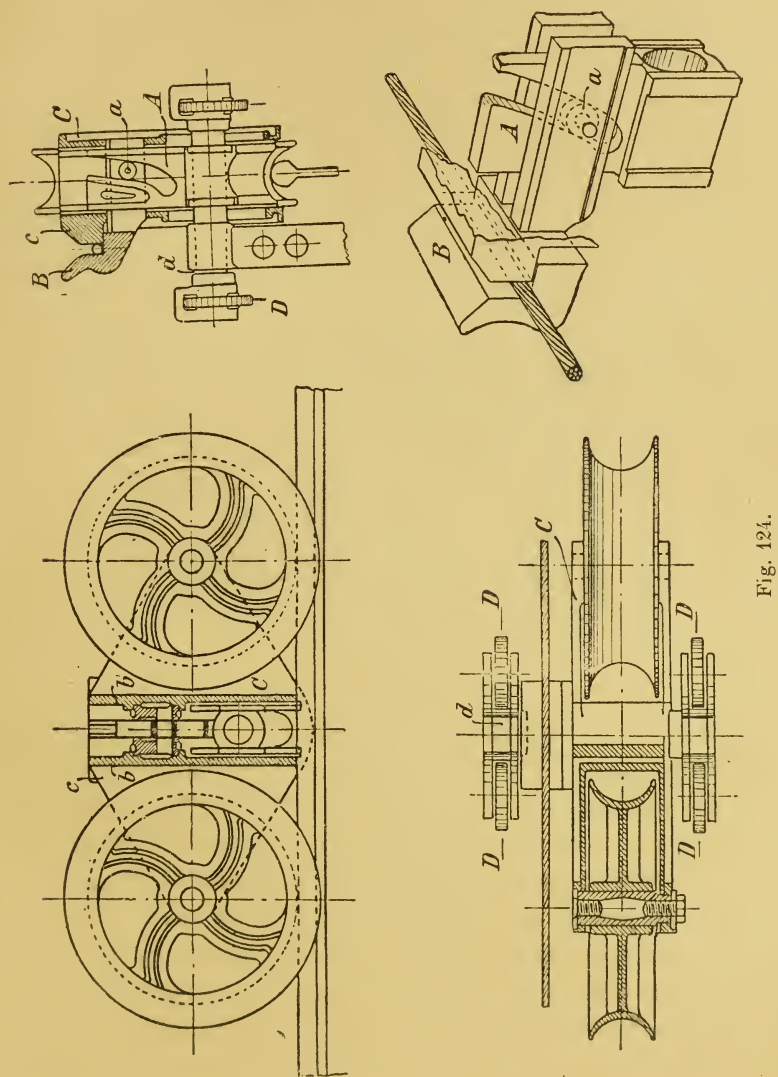


Fig. 124.

supérieure de cette pièce A se trouve pratiquée une rainure dans laquelle se déplace un petit rouleau *a* ;

2° Une mâchoire mobile B avec deux bras entre lesquels est placé le rouleau *a* ;

3° Une traverse C qui présente quatre guides correspondant aux surfaces de glissement du coulisseau A, un évidement horizontal pour le passage des bras de la mâchoire mobile et deux ouvertures correspondant à l'axe *d* de la suspension ;

4° Quatre galets D montés sur l'axe *d* et destinés à l'accrochage et au décrochage du wagonnet.

Le fonctionnement de cet appareil a lieu comme suit : pour accrocher le wagonnet au câble tracteur, il suffit de faire monter les galets D sur les rails inférieurs formés par des cornières (fig. 125), tandis que la tra-

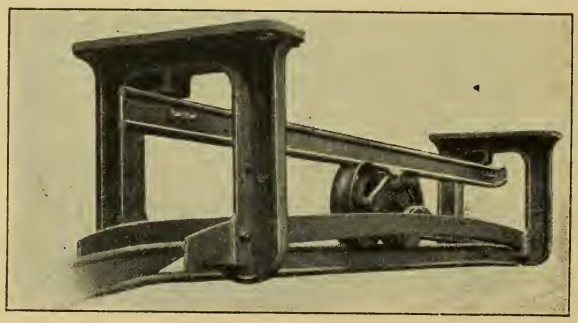


Fig. 125.

verse avec les roues du chariot est retenue par le contre-rail supérieur à double champignon. Le coulisseau A monte, avec les galets D, déterminant ainsi le déplacement du rouleau *a* et par suite l'éloignement de la mâchoire mobile. A ce moment, le câble tracteur peut entrer par le haut entre les mâchoires, mais comme les rails se recourbent presque aussitôt vers le bas, en produisant la descente de l'axe et du coulisseau A, la mâchoire mobile se rapproche de la mâchoire fixe et serre le câble.

Pour le décrochage on se sert du même agencement de rails. Le mouvement de la mâchoire mobile, réglé par l'inclinaison de la rainure du coulisseau, est d'abord rapide pour devenir à fin de course beaucoup plus lent.

Ce dispositif, qui peut être employé en toute sécurité sur des pentes de 45° avec des vitesses de $2^m,50$ à $3^m,50$ à la seconde, donne une pres-

sion sur le câble à peu près égale à celle obtenue avec l'appareil à double filet d'Otto et de Pohlig.

Dans l'exemple de la figure 124, le câble tracteur est indiqué au-dessus du chariot, mais il peut tout aussi bien être placé au-dessous. La photographie de la figure 126 montre un appareil « Idéal » avec câble disposé à la partie inférieure du chariot.

La figure 127 représente un accouplement de la maison Arthur Koppel

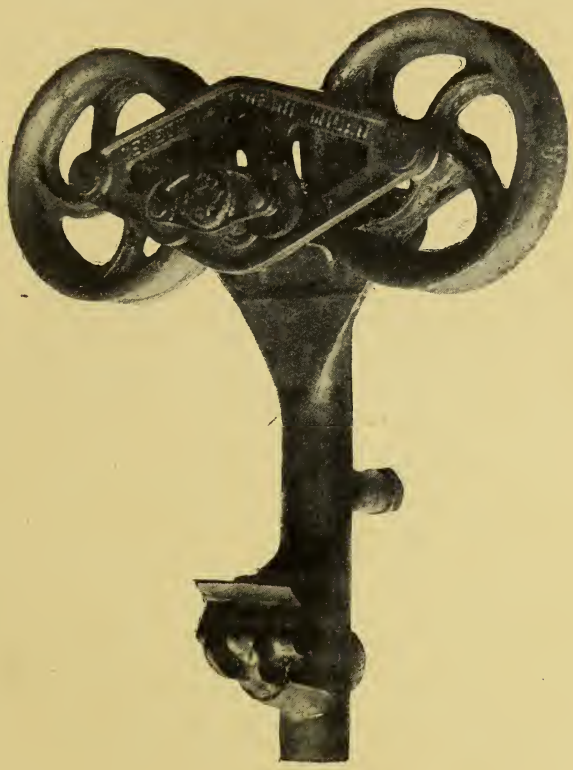


Fig. 126.

de Berlin, analogue au précédent, avec mâchoires en forme de coins. La mâchoire mobile fait corps avec le coulisseau et se déplace verticalement Le poids de la charge et du wagonnet se décompose suivant un angle très peu incliné sur l'horizontale, de sorte que la force agissant sur le câble est beaucoup plus grande que le poids initial. La mâchoire fixe

peut tourner légèrement autour d'un axe parallèle au câble tracteur pour permettre le réglage de l'appareil après usure du câble. Le relevage du coulisseau est effectué par un rail de pression qui vient appuyer sur un galet monté à l'extrémité d'un levier placé à la partie supérieure du dispositif.

L'appareil Heckel-Farcot qui fonctionne également sous l'action du poids du wagonnet et de la charge, est prévu spécialement pour le passage automatique des courbes dans les deux sens.

Comme le montre la fig. 128, le bâti du chariot est prolongé vers le bas et à sa partie inférieure se trouve articulée la mâchoire d'accouple-

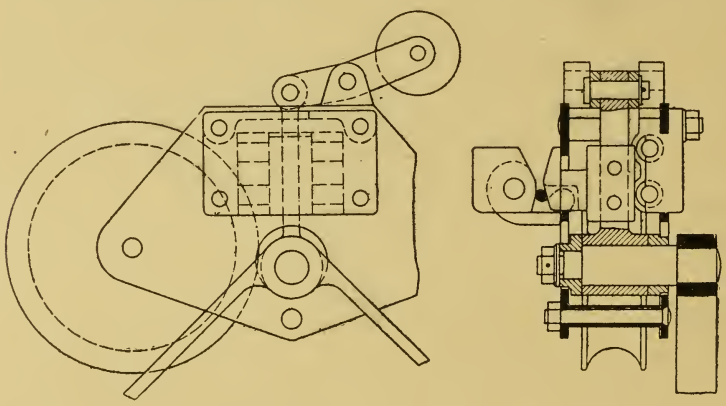


Fig. 127.

ment. Ce bras porte aussi à cet endroit une pièce coulissante dans laquelle sont montés l'axe d'articulation de la suspension du wagonnet et le galet d'accouplement. A la hauteur des poulies-guide, le bâti et la mâchoire mobile présentent deux faces de guidage analogues permettant le passage dans les deux sens de courbure.

Dans cet appareil on a également cherché à rapprocher autant que possible le point d'application de la charge du câble tracteur, afin que la pression de chaque galet de roulement soit la même avec n'importe quelle pente.

Tous ces appareils fonctionnant sous l'action du poids du wagonnet ont l'inconvénient de moins serrer le câble sur les rampes qu'en palier, alors que le contraire serait préférable. La force naturelle verticale

exercée par le wagonnet se décompose suivant deux directions ; l'une perpendiculaire et l'autre parallèle à la voie de roulement : la première

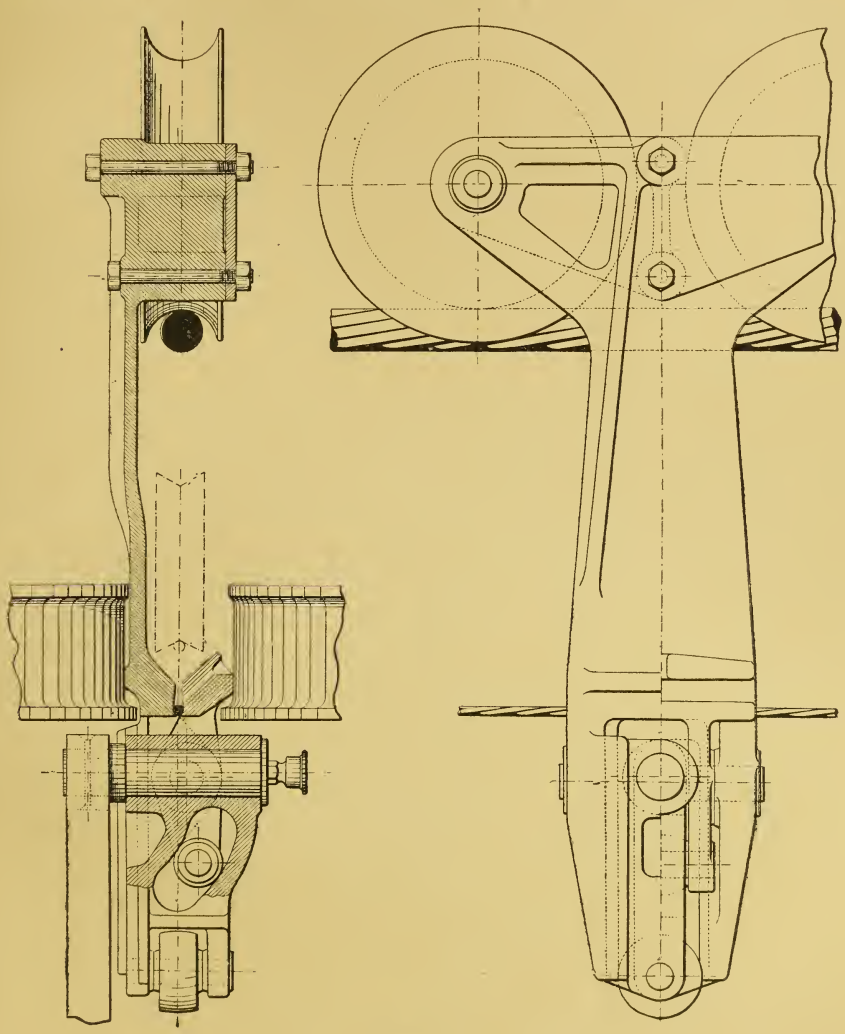


Fig. 128.

force agit normalement sur la pince, tandis que l'autre est absorbée par les guidages du coulisseau.

Pour obvier à cet inconvénient, l'auteur de cet ouvrage a construit un appareil utilisant à tout moment et dans n'importe quelle condition le

poids entier de la charge pour l'accrochage au câble tracteur (fig. 129). Le coulisseau est guidé seulement par les deux flasques latérales et par la plaque A ; de l'autre côté il vient s'appuyer par une surface convexe de grand rayon contre un levier coudé B articulé autour d'un axe perpendiculaire à la voie de roulement. Lorsque le coulisseau descend, le levier B pousse la mâchoire mobile C contre la mâchoire fixe D. Un des galets d'accouplement E est articulé sur l'axe de la suspension, tandis que l'autre F est disposé à la partie supérieure de l'appareil et roule dans un fer]. Au moment du décrochage du câble tracteur, le coulisseau est poussé vers le haut et la partie en forme de crochet G vient buter contre le levier B, lequel amène alors la mâchoire C dans sa position inférieure.

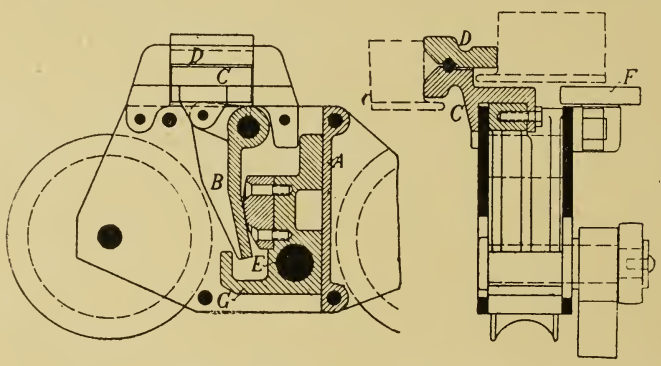


Fig. 129.

La forme particulière des mâchoires permet à l'appareil de contourner les poulies-guide en s'appuyant avec n'importe quel côté, de sorte que la ligne peut présenter des coudes dans les deux sens et que le wagonnet peut être soutenu par sa partie inférieure aux changements brusques de pente. Si l'angle formé par la face d'appui du levier B dans sa position normale avec la verticale a été convenablement choisi, la fermeture de ce dispositif d'accouplement offre plus de sécurité que celle de Ceretti et Tanfani dans les pentes raides ou lorsque le wagonnet est brusquement culbuté sur le parcours, car le frottement de glissement est plus grand que le frottement de roulement.

En prenant un rapport approprié entre les leviers des différents efforts, l'appareil de la figure 129 permet d'obtenir la pression des mâchoires

voulue et de monter les plus fortes rampes. Pour une inclinaison déterminée de la voie, le rapport des bras de levier x est donné par l'exposé ci-après :

Si on désigne par :

G_1, le poids de la charge agissant sur les mâchoires ;

G_2, le poids du chariot sans le coulisseau ;

Δ, la sécurité au glissement de la mâchoire ;

μ_0, le coefficient de frottement du câble sur les mâchoires ;

μ, la résistance au roulement du wagonnet ;

on a pour une inclinaison α du câble porteur :

$$G_1 \cos \alpha \times x\mu_0 = (G_1 + G_2)(\sin \alpha + \mu \cos \alpha)\,\Delta,$$

d'où

$$x = \frac{\Delta}{\mu_0}\left(1 + \frac{G_2}{G_1}\right)(\operatorname{tg} \alpha + \mu).$$

D'après les expériences de Rennie, lorsque la pression des mâchoires sur le câble est maximum, le coefficient de frottement $\mu_0 \sim 0{,}36$ et la sécurité la plus faible que l'on doit admettre est $\Delta = \frac{5}{4}$.

Dans le cas d'un wagonnet vide avec $G_1 = 150$ kilogrammes, $G_2 = 65$ kilogrammes et $\mu = \frac{1}{70}$ on a :

$\operatorname{tg} \alpha =$	0,0	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
$x =$	0,073	0,586	1,10	2,12	3,14	4,17	5,19	6,22	7,24	8,26

Comme il sera dit plus loin, la pression sur le câble tracteur qui est nécessaire dans la plus forte rampe est inutile dans les parties en palier de la ligne. Pour protéger le câble tracteur J. Pohlig. A.-G. a imaginé un appareil, sans toutefois le construire, dans lequel le poids de la charge appuie les deux mâchoires directement l'une contre l'autre lorsque le wagonnet est sur une voie horizontale, et exerce une pression qui augmente en même temps que l'inclinaison de la voie. Dans cet appareil la suspension n'est pas folle sur l'axe, mais au contraire fixée sur celui-ci qui tourne lorsque le chariot de roulement s'incline (fig. 130). Sur la suspension se trouve fixé un anneau circulaire présentant des

faces inclinées qui viennent s'appuyer sur les parties correspondantes du coulisseau, de sorte que lorsque le chariot prend une certaine inclinaison, l'axe se déplace dans le coulisseau en pressant fortement les mâchoires l'une contre l'autre. Le relevage du coulisseau se fait par le galet placé à la partie supérieure du dispositif; deux petits rouleaux horizontaux guident en même temps le wagonnet. Pour augmenter encore l'action exercée par les mâchoires, les faces de pression font un angle de 45° avec la direction des forces et on obtient de ce fait une multiplication d'environ 1,4. Le principe de cet accouplement paraît très bon, il est seulement à craindre que l'oscillation de la suspension soit trop grande dans les fortes pentes. Le pendant peut ne pas reprendre la po-

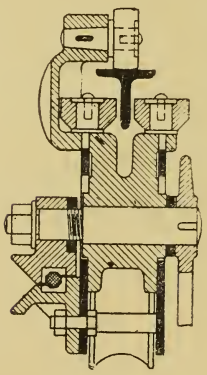


Fig. 130.

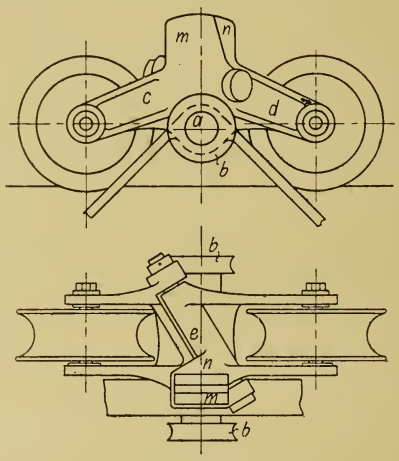


Fig. 131.

sition verticale lorsque les mâchoires sont fortement appliquées l'une contre l'autre ou ne pas revenir dans sa position normale par suite de coïncement dans les rampes.

Nous mentionnerons encore l'appareil de Ad. Bleichert et Cie représenté par la figure 131 et destiné aux installations n'offrant que de faibles pentes, dans lequel il n'y a qu'une partie du poids du wagonnet qui agit. L'axe *a*, qui porte la suspension du wagonnet et les galets d'accouplement *b*, est monté dans les deux joues *c* et *d* du chariot. Ces dernières ne sont pas fixes, mais au contraire articulées autour de l'axe oblique *e*. La mâchoire *m* est venue de fonderie avec la joue *c*, tandis

que l'autre *n* est d'une seule pièce avec *d*. Lorsque les galets *b* roulent sur les rails d'accouplement, la partie centrale de l'appareil se soulève et les mâchoires s'ouvrent ; au moment où les galets *b* quittent les rails, le poids du wagonnet abaisse les bras *c* et *d* et la pince se trouve ainsi fermée.

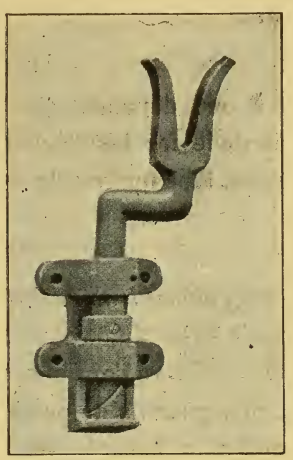


Fig. 132.

Dans le cas de voies suspendues s'écartant peu de l'horizontale, on peut se contenter d'un dispositif d'accrochage beaucoup plus simple que ceux qui viennent d'être décrits. On emploie les fourches d'entraînement coudées dont on se sert pour les wagonnets à voies étroites ; ces fourches sont montées dans un œillet du chariot de roulement.

La figure 132 représente un dispositif de la maison Ernst Heckel de Saarbruck.

14. Stabilité des wagonnets. — Autrefois on adaptait toujours l'appareil d'accouplement à la suspension afin d'avoir le poids du câble tracteur au-dessous de la voie de roulement et d'aider ainsi à maintenir le wagonnet dans la position d'équilibre. Ce fut Bleichert qui le premier se départit de cette règle en plaçant les mâchoires sur le chariot de roulement : il obtint l'avantage d'avoir toujours les wagonnets verticaux, même dans les plus fortes rampes. Cette disposition a toutefois son inconvénient : aux changements brusques de pente, le poids du câble tracteur et la résultante de la tension de ce câble dirigée vers le bas agissent en dehors de l'axe du rail et tendent à maintenir le wagonnet incliné.

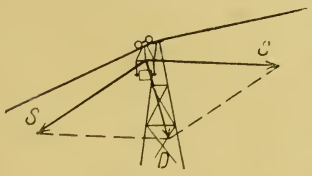


Fig. 133.

Prenons comme exemple la position représentée par la figure 133 dans laquelle les deux directions du câble tracteur font entre elles un angle $\varphi = 10°$, ce qui se présente souvent dans la pratique ; la tension du

câble étant S = 750 kilogrammes, on aura sur l'accouplement une pression :

$$D = 2 S \sin \frac{\varphi}{2} = 130 \text{ kilogrammes}$$

Si le centre de gravité d'un wagonnet de poids total :

$$Q + G = 160 \text{ kilogrammes},$$

est à une distance $u = 50$ centimètres au-dessous du câble porteur, le bras de levier des mâchoires à la voie de roulement étant $v = 8$ centimètres, l'inclinaison du wagonnet sous l'action de D est donnée par :

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{D \times v}{(Q + G)\, u} = 0{,}146,$$

correspondant à un angle $\beta = 7°,25'$. Dans certaines installations, v atteint jusqu'à 13 centimètres et dans les mêmes conditions on aurait $\beta = 11°50'$.

On équilibre dans une certaine mesure l'action du câble tracteur dans les changements de pente en coudant la suspension du wagonnet, désaxant ainsi le centre de gravité de ce dernier par rapport au plan vertical du chemin de roulement ; le wagonnet se trouve alors légèrement incliné de l'autre côté sur une voie droite. Malgré cela, le wagonnet oscille toujours et surtout lorsqu'à l'action du câble tracteur vient s'ajouter celle d'un vent un peu violent. Une faible inclinaison suffit généralement pour empêcher le levier de culbutage de fonctionner ; aussi dans de tels cas préfère-t-on employer un appareil d'accouplement placé au-dessous du chariot.

Dans les chemins aériens avec fortes rampes ou changements brusques de pente, on emploie toujours un appareil avec accrochage en dessous. Si un wagonnet se trouve sur une voie d'inclinaison α_0 (fig. 134) :

G, étant son poids propre ;

Q, le poids de la suspension de la caisse et de la charge ;

S_1 et S_2 les tensions du câble tracteur qui font avec la direction du mouvement des angles β_1 et β_2 ;

N_1 et N_2 les pressions des roues du chariot ;

Les conditions d'équilibre sont :

$$N_1 + N_2 = Q \cos \alpha + G \cos \alpha + S_1 \sin \beta_1 + S_2 \sin \beta_2,$$

$$o = Q \sin \alpha + G \sin \alpha - S_1 \cos \beta_1 + S_2 \cos \beta_2,$$

$$(N_2 - N_1) \frac{a}{2} = - Q \sin \alpha\, (b + c) - G \sin \alpha\, (b + d).$$

Dans ces égalités on a négligé les résistances au roulement μN_1 et μN_2, qui ont très peu d'influence sur l'exactitude des résultats. Les égalités ci-dessus sont valables pour le mouvement du chariot dans les deux sens.

La deuxième égalité donne :

$$S_2 = S_1 \frac{\cos \beta_1}{\cos \beta_2} - (Q + G) \frac{\sin \alpha}{\cos \beta_2}.$$

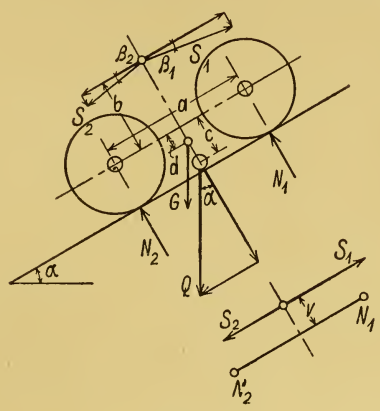


Fig. 134.

Portons cette valeur dans la première égalité et divisons la troisième par $\frac{a}{2}$, nous obtenons alors en additionnant :

$$N_1 = \frac{Q + G}{2} \sin \alpha \left[\operatorname{cotg} \alpha - \operatorname{tg} \beta_2 \pm \frac{2b}{a} \pm 2 . \frac{Qc + Gd}{(Q + G)a} \right] + \frac{S_1}{2} \times \frac{\sin (\beta_1 + \beta_2)}{\cos \beta_2}.$$

A ceci vient s'ajouter l'effort de traction du câble

$$S_1 \cos \beta_1 - S_2 \cos \beta_2 = (Q + G) \sin \alpha$$

à l'extrémité d'un levier v occasionnant une rotation du wagonnet dont les roues prennent la position de la figure 135. Au point d'appui de la roue la plus chargée on a alors :

$$N_0 = \frac{N}{\cos \gamma}$$

$$(N \operatorname{tg} \gamma + \mu_0 N_0 \cos \gamma)\, a = (Q + G) \sin \alpha \,.\, v.$$

D'où il résulte pour la roue la moins chargée

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{(Q + G)\, v}{N \,.\, a} \sin \alpha - \mu_0,$$

dans laquelle on peut admettre que le coefficient du frottement des galets sur le câble $\mu_0 \simeq 0,1$.

Si l'on introduit la valeur de N obtenue ci-dessus on aura finalement :

$$\operatorname{tg} \gamma + \mu_0 = \frac{\dfrac{2v}{a}}{\operatorname{cotg} \alpha - \operatorname{tg} \beta_2 \pm \dfrac{2b}{a} \pm 2\dfrac{Qc + Gd}{(Q+G)a} + \dfrac{S_1}{Q+G} \times \dfrac{\sin(\beta_1 + \beta_2)}{\cos \beta_2 \sin \alpha}}.$$

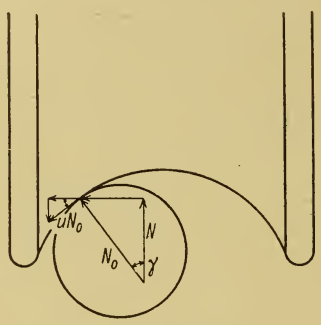


Fig. 135.

Afin d'avoir une idée exacte des relations réelles, nous allons calculer les valeurs de N_1, N_2 et $\operatorname{tg} \gamma + \mu_0$ pour différentes valeurs. Dans tous les cas, nous prendrons :

l'écartement des roues $a = 40$ centimètres,

l'inclinaison du câble $\beta_1 = \beta_2 = 1°$, qui est une très petite valeur,

la tension du câble $S_1 = 350$ kilogrammes, c'est-à-dire presque le minimum,

le poids du wagonnet $G = 75$ kilogrammes,

la charge $Q = 75$ kilogrammes (à vide) et 600 kilogrammes (wagonnet plein).

Dans un wagonnet approprié au passage des courbes dirigées dans les deux sens, on a à peu près les dimensions suivantes : $b = 20$ centimètres, $c = 5^{cm},5$, $d \simeq 0$ et $v = 8$ centimètres. Si on suppose, sur une pente d'inclinaison α, la pression des roues égale à quatre fois la pression sur une voie horizontale $N = \frac{Q+G}{2}$, on a alors les courbes a_1 pour les wagonnets vides de 75 kilogrammes et a_2 pour les wagonnets pleins de 600 kilogrammes dans les figures 136 et 137. Avec une inclinaison de

39°, la roue arrière se trouve déjà complètement déchargée. Les courbes de la figure 138 qui représentent les valeurs de tg $\gamma + \mu_0$ se rapprochent de la parabole et prouvent que cette disposition ne peut être employée que jusqu'à 29° (a_1 et a_2) si l'on veut laisser l'angle γ de la figure 135

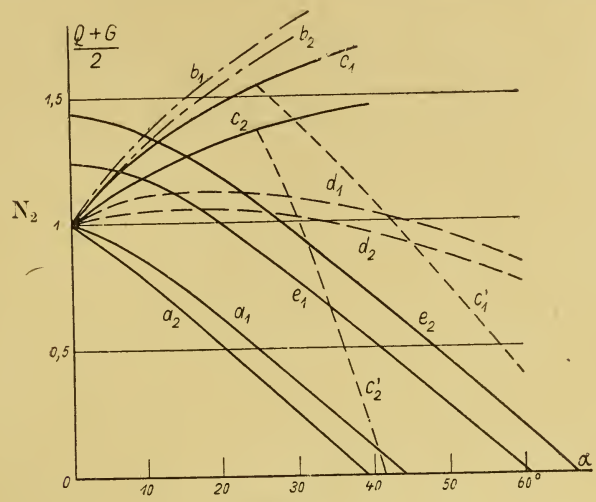


Fig. 136.

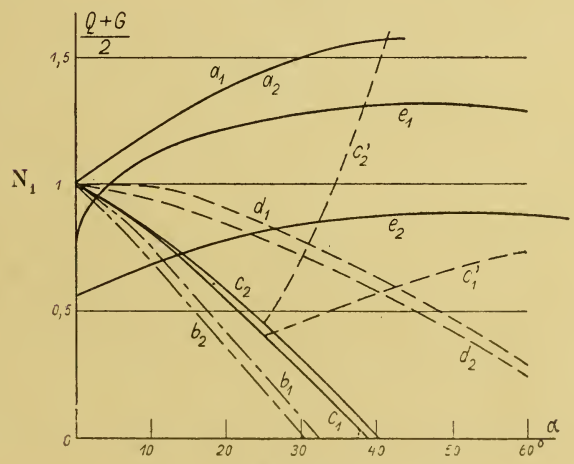


Fig. 137.

au-dessous de 30°. Lorsqu'on est ainsi à la limite, un excédent d'oscillation déterminé par le vent ou une secousse brusque du câble tracteur peut déterminer la chute du wagonnet.

Comme le montrent les figures 136 et 137, l'appareil d'accouplement s adaptant à la suspension est avantageux pour les transporteurs avec rampes ne dépassant pas 25°. Dans les très fortes pentes, les deux dispositions sont aussi désavantageuses l'une que l'autre.

L'appareil d'accouplement doit être suffisamment bas pour ne pas rencontrer les traverses supportant le câble porteur. Ad. Bleichert & C° ont apporté un perfectionnement très important à ce genre de construction en plaçant l'articulation de la suspension entre l'axe du chariot et

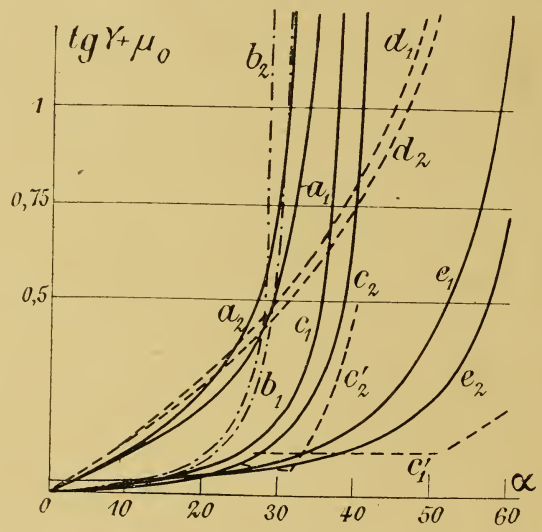


Fig. 138.

l'accouplement. Dans ces conditions on a : $b = -40$ centimètres, $c = 20$ centimètres, $d \sim 6$ centimètres, $v = \frac{1}{2}$ centimètre. Les courbes c_1 et c_2 correspondant aux charges de 75 et 600 kilogrammes montrent que la roue supérieure 1 est complètement déchargée sur une pente de 39°. On peut employer en toute sécurité la disposition dont les courbes sont représentées par la figure 138 jusqu'à ce que la roue supérieure n'exerce plus aucune pression sur le câble porteur.

La disposition la plus avantageuse pour la pression des roues est celle dans laquelle les mâchoires d'accouplement se trouvent à la hauteur de l'axe d'articulation de la suspension, comme dans l'appareil de Pohlig ou d'Otto où l'axe sert en même temps de vis de serrage. On a

dans ce cas $b = -5$ centimètres, $c = 0$, $d = -2$ centimètres, $v = 13$ centimètres, et $a = 35$ centimètres ; les courbes d_1 et d_2 indiquent que la pression de la roue 2 est presque constante et que dans une rampe de 60° la pression de la roue 1 est encore suffisante. Le câble tracteur se trouvant un peu éloigné de la voie de roulement, on ne doit employer ces appareils caractérisés par la figure 138 que dans des pentes ne dépassant pas 35°.

L'équation donnant la valeur de $\operatorname{tg} \gamma + \mu$ montre que la disposition la plus avantageuse est celle dans laquelle v est minimum. Pour cette raison la maison Ernst Heckel a modifié l'appareil d'Obach en plaçant l'accouplement directement au-dessus du chariot, de telle sorte qu'avec $v \sim 3$ centimètres le câble tracteur tombe entre les pylônes tout près du câble porteur (fig. 139). Comme les dimensions sont à peu de chose près

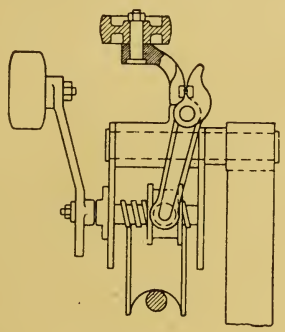


Fig. 139.

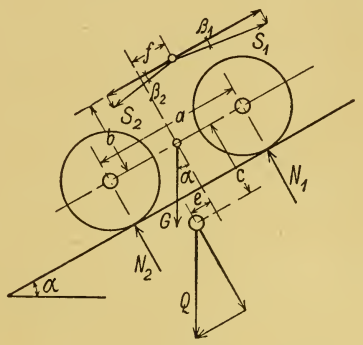


Fig. 140.

les mêmes que pour les courbes a, dans ce dernier cas on devra multiplier les ordonnées de la figure 138 par $\frac{3}{8}$. Jusqu'à 30° on obtient ainsi un fonctionnement sensiblement meilleur qu'avec l'appareil précédent.

Le perfectionnement relatif à la pression des roues peut être poussé aussi loin que l'on veut en excentrant l'axe de la suspension par rapport à l'axe du wagonnet. Une autre disposition très avantageuse, lorsqu'elle peut être appliquée, consiste à désaxer les mâchoires d'accouplement. On obtient alors avec la notation de la figure 140 :

$$N_{\frac{1}{2}} = \frac{Q + G}{2} \sin \alpha \left[\operatorname{cotg} \alpha \left(1 \mp \frac{Q}{Q + G} \times \frac{2e}{a} \right) - \operatorname{tg} \beta_2 \left(1 \pm \frac{2f}{a} \right) \right.$$
$$\left. \pm \frac{2b}{a} \pm \frac{Q}{Q + G} \times \frac{2c}{a} + \frac{S_1}{Q + G} \times \frac{\sin(\beta_1 + \beta_2)}{\cos \beta_2 \sin \alpha} \left(1 \pm \frac{2f}{a} \right) \right].$$

Admettons par exemple que $b = 20$ centimètres, $f = -9^{cm},5$, $e = 10$ centimètres, $c = 8$ centimètres et $v = 3$ centimètres, d'après un projet de l'auteur du présent ouvrage (fig. 141) on obtient les courbes e_1 et e_2 (fig. 136-138). Comme on peut le remarquer, la roue inférieure n'exerce une pression sur la voie de roulement que lorsque la pente atteint 60°, malgré que les mâchoires se trouvent à la partie supérieure ; on peut employer en toute sécurité cette disposition pour des inclinaisons allant jusqu'à 50°, car v est très petit et le wagonnet ne tend pas à osciller même quand la tension S est très grande. Lorsque le chemin aérien

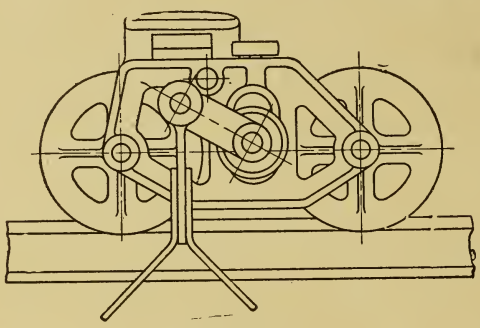


Fig. 141.

présente des pentes très raides dans les deux sens, on change le levier incliné de côté au moyen d'un guidage approprié (fig. 142).

La maison Ad. Bleichert et Cie a résolu d'une façon très heureuse cette question d'appareil d'accouplement pour chemins aériens avec pentes rapides dans les deux sens, en modifiant son accouplement à mâchoires en dessous, sans employer de levier culbutant. Lorsque le chariot se trouve sur une pente déterminée δ variant de 25 à 30°, la suspension vient s'appuyer sur un butoir, et le tout se comporte alors comme le dispositif représenté schématiquement par la figure 140. L'égalité précédente est encore applicable si l'on augmente le membre entre crochets de la quantité $\pm \frac{G}{Q + G} \times \frac{2d}{a}$, G étant le poids du wagonnet appliqué à une distance d de l'axe (fig. 134).

Dans les constructions les plus courantes, on peut admettre que le centre de gravité de la suspension et de la caisse vide se trouve à 85 centimètres au-dessous de l'axe de suspension, et dans les wagonnets

pleins à une distance $g = 115$ centimètres. Dans ce cas, on a tout d'abord (fig. 140) $c = 20 + 85 = 105$ centimètres et ensuite $c = 20 + 115 = 135$ centimètres. De plus $e = g \operatorname{tg} \delta$. Si nous admettons que $b = -40$ centimètres, $d = 6$ centimètres, $f = 0$ et $\delta = 25°$, à partir de 25° les courbes c_1 et c_2 des figures 136 et 137 se continuent comme nous l'avons indiqué en pointillé. On remarque que cette disposition est très avantageuse pour les wagonnets vides, mais que par contre la roue inférieure des wagonnets est rapidement déchargée parce que le bras de levier de la charge est trop long. Si l'on fait $\delta = 30°$, on améliore légèrement l'appareil, mais d'une façon peu sensible tant que l'on ne raccourcit pas la suspension. Les courbes correspondantes de la figure 138, établies en admettant $v = 2$ centimètres et en prenant pour la construction de Ad. Bleichert et Cie les ordonnées égales au $\frac{1}{4}$ de celles de la figure, varient dans le même sens que les précédentes.

Le plus souvent le câble tracteur agit au milieu de la suspension comme l'indique le schéma de la figure 142. On a alors deux parties

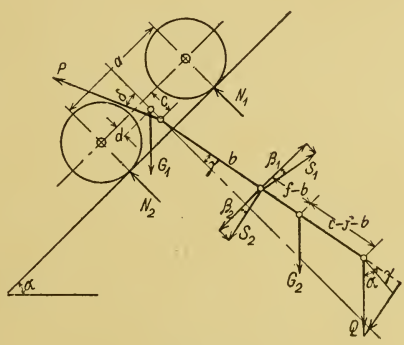


Fig. 142.

bien distinctes : premièrement la suspension sur laquelle agit la charge utile Q à une distance c de l'axe, son poids propre G_2 à une distance f, les tensions S_1 et S_2 du câble tracteur à une distance b et finalement la réaction P du wagonnet faisant avec l'axe du pendant un angle δ qui agit sur l'axe même ; deuxièmement le wagonnet lui-même de poids propre G_1 équilibré par les forces N_1 et N_2 et sur lequel agit vers le bas la force P.

On déduit de la figure les conditions d'équilibre suivantes pour la suspension :

$$+ Q \cos \alpha + G_2 \sin \alpha + S_1 \sin \beta_1 + S_2 \sin \beta_2 - P \cos . \delta = o$$
$$+ Q \cos \alpha + G_2 \sin \alpha - S_1 \sin \beta_1 + S_2 \sin \beta_2 - P \sin \delta = o$$
$$+Q \times c \sin(\alpha+\gamma) + G_2 \times f \sin(\alpha+\gamma) + S_2 \times b \times \cos(\gamma-\beta_2) - S_1 \times b \times \cos(\gamma-\beta_1) = o$$

pour le wagonnet :

$$+ N_1 + N_2 - G_1 \cos \alpha - P \cos \delta = 0$$
$$+ G_1 \sin \alpha - P \sin \delta = 0$$
$$- N_1 \times \frac{a}{2} + N_2 \times \frac{a}{2} - G_1 (e - d) \sin \delta = 0.$$

Comme il a déjà été dit :

$$S_2 = S_1 \frac{\cos \beta_1}{\cos \beta_2} - (Q + G_1 + G_2) \times \frac{\sin \alpha}{\cos \beta_2}.$$

Les deux premières égalités donnent :

$$\operatorname{cotg} \delta = \frac{(Q + G_2) \cos (\alpha - \beta_2) - G_1 \sin \alpha \sin \beta_2 + S_1 \sin (\beta_1 + \beta_2)}{G_1 \sin \alpha \cos \beta_2}$$

et la valeur de la force P est donnée par l'avant-dernière :

$$P = G_1 \frac{\sin \alpha}{\sin \delta}.$$

Des deux autres égalités relatives au wagonnet on tire :

$$N_1 = \frac{1}{2} G_1 \left[\cos \alpha + \sin \alpha \left(\operatorname{cotg} . \delta + \frac{e - d}{\frac{1}{2} a} \right) \right]$$

$$N_2 = \frac{1}{2} G_1 \left[\cos \alpha + \sin \alpha \left(\operatorname{cotg} \delta - \frac{e - d}{\frac{1}{2} a} \right) \right].$$

Si l'on admet $e = d$, (ce que l'on fait généralement dans la pratique), la pression devient la même pour les deux roues. De plus comme on peut dans tous les cas prendre $v \backsim 0$, le wagonnet se trouve ainsi toujours en équilibre dans n'importe quelle rampe.

C'est pour cette raison que certaines maisons ont conservé ce mode d'accouplement malgré toutes les autres difficultés qu'il entraîne.

La dernière équation relative à la suspension permet de déterminer l'angle γ que fait l'axe du pendant avec la perpendiculaire à la voie de roulement :

$$\operatorname{tg}\gamma = \frac{Q(c-b) - G_1 \times b + G_2(f-b)}{(Q+G_1+G_2)b \operatorname{tg}\beta_2 - (Qc + G_2 f)\operatorname{cotg}\alpha + S_1 b \dfrac{\sin(\beta_1-\beta_2)}{\sin\alpha\cos\beta_2}}.$$

Le premier et le dernier terme du dénominateur sont presque toujours très petits et peuvent être négligés, de sorte que le calcul devient très simple. En admettant les valeurs numériques suivantes que l'on rencontre souvent dans la pratique, $b = 45$ centimètres, $c = 125$ centimètres, $f = 65$ centimètres, $Q = 525$ kilogrammes, $G_1 = 45$ kilogrammes, $G_2 = 100$ kilogrammes, on obtient dans le cas d'un wagonnet vide ($Q = 0$) la suspension presque perpendiculaire au câble porteur et avec le wagonnet plein les valeurs de γ suivantes :

$\alpha =$	10°	20°	30°	40°	50°
$\gamma = \sim$	0°	3°25′	9°25′	18°20′	33°50′
$\varepsilon =$	10°	16°25′	20°25′	21°40′	26°10′

ε étant l'angle que fait l'axe de la suspension avec la verticale.

Comme on voit, l'inclinaison est très grande et augmente en même temps que la valeur de Q. Pour éviter cet inconvénient, J. Pohlig adopte dans certains cas la forme de la figure 143 avec une pièce intermédiaire assez lourde présentant à sa partie inférieure une coulisse circulaire dans laquelle repose la suspension.

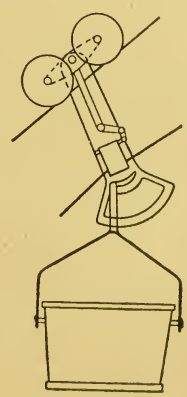


Fig. 143.

Les courbes des différentes figures de ce chapitre ne donnent pas des valeurs absolues pour la construction, mais elles permettent de comparer avantageusement les différents systèmes. Toutes les courbes de la figure 138 varient lorsqu'on a une grande tension du câble tracteur ou une flèche considérable, de même lorsque β est très grand.

15. Tracé de la ligne. — Malgré le degré de perfectionnement actuel des bicâbles, il n'est pas toujours possible de faire suivre au profil de la ligne le tracé voulu et ce n'est souvent qu'au prix de très grandes dépenses que l'on arrive à surmonter certaines difficultés.

Les tracés les plus faciles sont ceux des transporteurs à grand débit avec des wagonnets lourds se suivant à de courts intervalles, car les variations de tension du câble tracteur lorsqu'un wagonnet change de pente sont dans ce cas très peu sensibles. En principe la ligne ne doit pas présenter de déviations horizontales entre les stations. La maison Ad. Bleichert et Cie s'est cependant départie de cette règle et avec succès ; elle a construit aux mines de Courl, près de Dortmund, un chemin aérien avec une courbe horizontale de 20 kilomètres de rayon sans dispositif spécial. Ce tracé qui était nécessité par le refus de certains propriétaires de laisser passer le transporteur au-dessus de leur terrain, n'a qu'une longueur de 18° et cette installation est la seule de ce genre qui nous soit connue. En général, on effectue les déviations horizontales d'une ligne au moyen de stations courbes ou d'angle.

Les vallonnements du profil longitudinal offrent généralement peu de difficultés : on les traverse en prenant une portée suffisamment grande.

Les figures 1 et 2 de la planche I représentent les profils longitudinaux de deux chemins de fer aériens construits par J. Pohlig : le premier de $3^{km},600$ de longueur est destiné à transporter 20 tonnes de minerais de fer à l'heure, et sa descente est de 412 mètres ; le deuxième a 8 kilomètres de long avec une descente de 23 mètres et un débit horaire de 10 tonnes de bois.

L'écartement des pylônes est déterminé par le profil du terrain ; on a déjà construit des chemins aériens avec portées de 1100 mètres et plus, dans lesquels un câble de construction close prend, par suite de son poids propre, une flèche de 66 mètres entre deux pylônes. Lorsque 7 wagonnets de 500 kilogrammes se trouvent dans cette travée, le câble clos de 35 millimètres de diamètre, prend une flèche d'environ 88 mètres. Le câble tracteur qui est comparativement peu tendu pend encore quelques mètres plus bas que le câble porteur. On voit d'après cela que les grandes portées ne sont possibles que lorsqu'on a des abaissements de terrain suffisants.

En employant le coussinet d'appui avec patte de retenue décrit au chapitre 36, on peut abaisser à certains endroits le profil de la ligne et diminuer ainsi considérablement la hauteur des pylônes. On ne doit cependant employer ces coussinets qu'avec précaution dans les chemins aériens ayant plusieurs changements de pente, lorsque les charges unitaires sont lourdes et relativement éloignées les unes des autres comme c'est souvent le cas dans le transport des arbres. La tension du câble tracteur est alors sujette à de grandes variations, car il peut arriver que presque tous les wagonnets soient sur une montée nécessitant une force de 25 HP. et qu'un instant après ils se trouvent dans une descente, déterminant ainsi un excédent de force de 25 HP. Dans le cas d'une commande électrique, cette grande différence de force motrice est indiquée par l'ampèremètre qui donne en même temps les variations de tension du câble tracteur. Les flèches entre les wagonnets et entre les pylônes sont inversement proportionnelles à cette tension (voir les formules du chapitre 13).

Le passage des élévations de terrain offre beaucoup plus de difficultés et nécessite une plus forte dépense que celle des vallées. Comme le montrent les figures 1 et 2 de la planche I, les pylônes sont à ces endroits très rapprochés, car les câbles porteurs ne doivent pas avoir un angle de tangente supérieure à $\frac{1}{10}$, exceptionnellement $\frac{1}{8}$, si l'on veut éviter une usure trop rapide sous la pression du câble tracteur. Très souvent pour le passage des collines on est obligé de creuser le terrain; lorsque les élévations sont trop prononcées, ces tranchées ne suffisent pas et il faut percer un tunnel. Dans l'intérieur de celui-ci les voies de roulement sont formées par des rails suspendus et les câbles porteurs sont tendus à l'entrée par des contrepoids se déplaçant dans des fosses en maçonnerie. Ces deux genres de constructions ont dû être employés par la maison Ad. Bleichert et Cie dans le chemin de fer de 34 kilomètres qu'elle a installé pour le gouvernement de la République Argentine.

Lorsque la station terminale se trouve au pied d'un monticule, les wagonnets risquent de toucher le sol, surtout s'ils se suivent à des intervalles assez courts, aussi forme-t-on les voies de roulement avec

des rails, de la station jusqu'au sommet du terrain. La figure 144 montre un passage de ce genre d'après une construction de la maison Th. Otto et Cie. Pour empêcher les wagonnets de s'accrocher à la construction on a prévu des guidages en cornières sur lesquels viennent s'appuyer les caisses des wagonnets.

Lorsque les frais d'installation doivent être peu élevés, on effectue le passage des élévations de terrain sans tranchées ni tunnels. Dans ce cas on emploie généralement deux grands coussinets d'appui formés par une

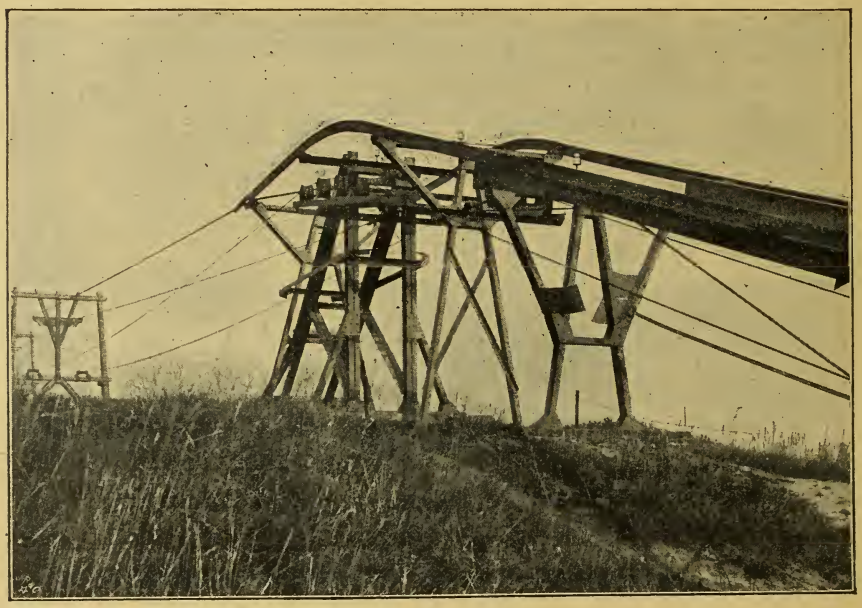


Fig. 144.

ou plusieurs pièces cintrées suivant la courbure du profil longitudinal de la ligne. Cette disposition gêne toutefois considérablement le mouvement des câbles porteurs ; aussi pour éviter cet inconvénient Th. Otto et Cie placent dans le coude du profil deux grands coussinets d'appui articulés qui oscillent légèrement au passage des wagonnets. Ceux-ci roulent dans la construction sur des rails placés immédiatement au-dessus des câbles porteurs. Le câble tracteur décrit un arc de cercle de grand rayon guidé par quatre rouleaux disposés directement au-dessous de l'appareil d'accouplement, lequel n'occasionne ainsi qu'un faible soulèvement du câble.

Lorsque le dispositif d'accouplement est fixé au chariot, on dispose les mâchoires de façon à ce qu'elles s'ouvrent par le bas, le guidage du câble tracteur se faisant de la même manière au moyen de poulies-guide de $0^m,600$ à $0^m,900$ de diamètre.

La disposition des pylônes et leur écartement sont déterminés par les conditions locales du terrain comme le montrent les profils longitudinaux de la planche I. On les place autant que possible de façon à n'avoir pas deux grandes portées consécutives qui donneraient aux câbles porteurs une brisure trop brusque sous la charge des wagonnets. Sur une voie horizontale ou presque, il est préférable, autant qu'on le peut, de n'avoir qu'un wagonnet entre deux pylônes consécutifs. Lorsqu'on a des supports suffisamment hauts pour permettre le passage d'une charrette chargée au-dessous des câbles, on prend comme portée moyenne 60 à 80 mètres. Les petits pylônes doivent être distants d'environ 35 à 45 mètres. D'autre part, si l'on a de grandes distances entre les wagonnets, en terrain plat, on peut aller facilement jusqu'à 100 mètres de portée moyenne.

46. Stations d'angle. — Il arrive souvent que l'on ne peut pas réunir deux points par un transporteur en ligne droite, soit à cause du refus de certains propriétaires de laisser passer le chemin aérien au-dessus de leur terrain, soit parce que l'installation est dans les montagnes et doit traverser une vallée trop large, soit pour une autre raison ; on est alors conduit à établir dans un endroit approprié une station d'angle ou de changement de direction. Le câble tracteur est guidé dans cette station par des poulies d'environ $1^m,50$ de diamètre ; les wagonnets quittent le câble en arrivant et sont poussés à la main sur des rails jusqu'à l'autre extrémité de la station où ils se raccrochent et continuent automatiquement leur course. Les câbles porteurs sont interrompus dans cette station et tendus ou ancrés selon les conditions du terrain. Cette disposition, employée dans le cas d'un appareil d'accouplement fixé à la suspension, ne permet pas le passage automatique des courbes dans les deux sens, et nécessite deux hommes pour son service. Les figures 145 et 146 montrent deux stations de ce genre : la première avec charpente métallique pour wagonnets à double sus-

pension d'après Ad. Bleichert et Cie, la seconde avec charpente en bois de Th. Otto et Cie.

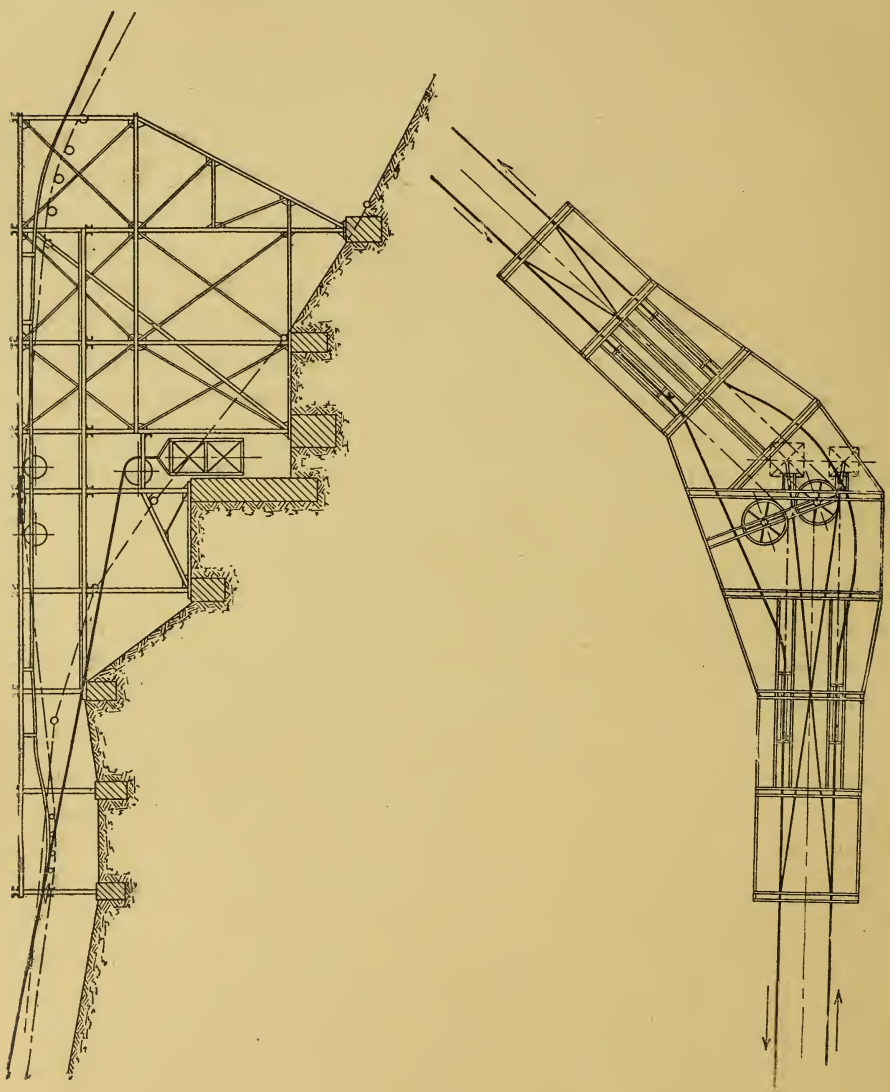


Fig. 145.

Lorsque les mâchoires sont placées au-dessus du chariot, elles viennent s'appuyer sur les poulies d'angle et guident automatiquement le wagonnet dans la station. Pour obtenir une déviation progressive, on dis-

pose toute une série de poulies-guide suivant un arc de cercle (fig. 147). Avec cette disposition la force centrifuge ne nuit pas au bon fonctionnement de l'installation.

Les wagonnets oscillent sous l'action de leur poids propre et de la force centrifuge de la quantité :

$$x = z \operatorname{tg} \alpha$$

dans laquelle égalité

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v^2}{rg}$$

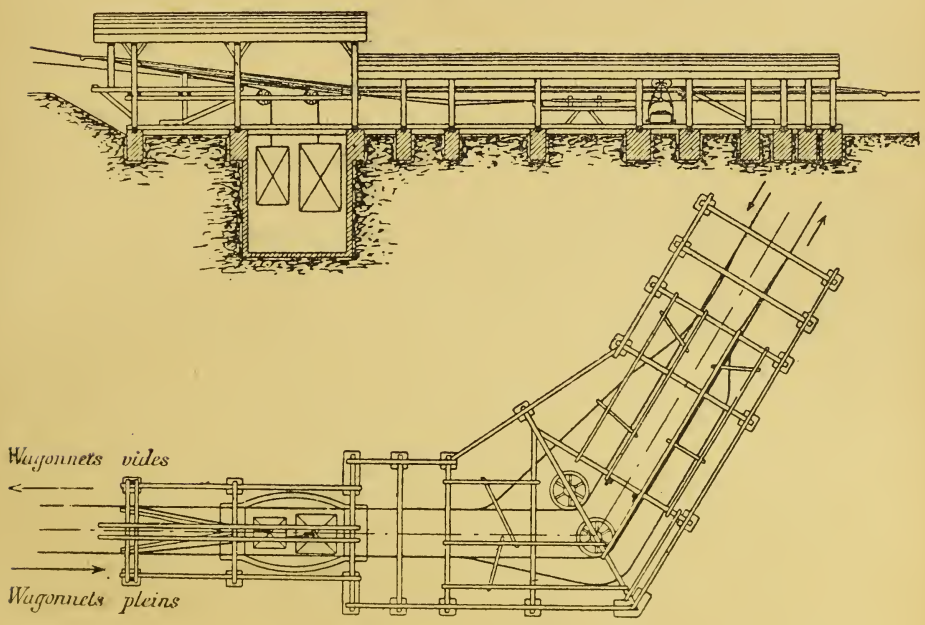


Fig. 146.

z, étant la distance du point le plus bas de la caisse au chemin de roulement que l'on peut admettre en général égale à $1^m,800$,

v, la vitesse du câble tracteur variant de $1^m,50$ à 3 mètres par seconde,

r, le rayon de la station d'angle en mètres,

g, l'accélération de la pesanteur $9^m,81$.

Le diamètre des poulies-guide est relativement petit, et au passage de chacune d'elles l'oscillation de la caisse augmente un peu, de sorte que

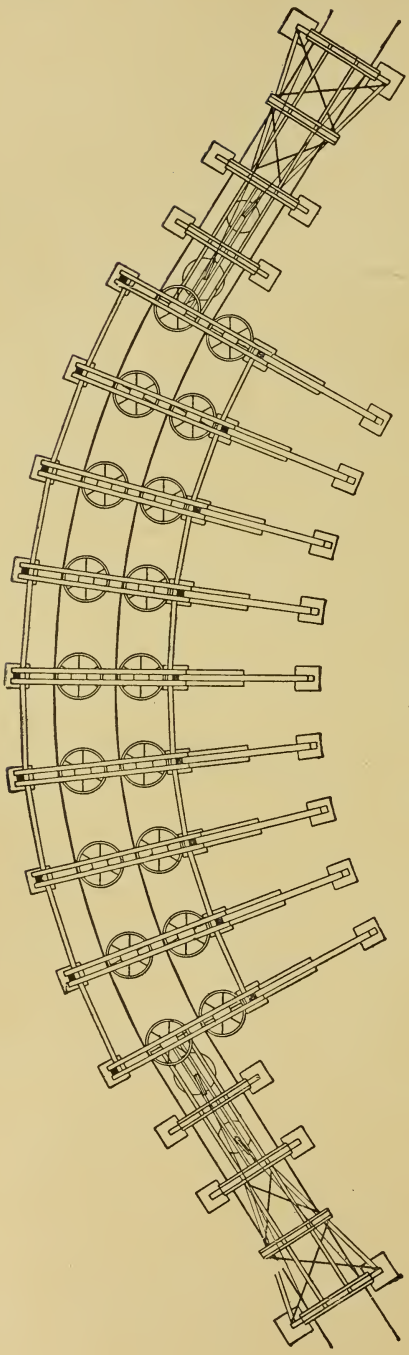


Fig. 147.

dans les calculs on ne prend pas x supérieur à $2^m,50$ ou 3 mètres. L'égalité précédente nous donne dans ces conditions, pour $v = 1^m,50$ à la seconde, un rayon intérieur $r = 16^m,50$ et pour $v = 2^m,50$, $r = 38$ mètres. Afin d'avoir un guidage absolument sûr, on dispose presque toujours sur le chariot ou sur la suspension un galet spécial qui vient rouler sur un fer ⌊⌋ dans la station.

Pour empêcher le câble de quitter la première poulie-guide dans le cas d'une grande flèche, on dispose devant la poulie des rouleaux porteurs qui sont poussés sur le côté par le wagonnet au moment de son passage. Les rouleaux sont montés sur un levier d'environ 2 mètres de longueur, suspendu par une extrémité à une chaîne et articulé à l'autre autour d'un axe faisant un angle de 15 à 20° avec la verticale. Sous l'action de son propre poids, le levier vient avec les rouleaux se placer de lui-même tout près de la poulie-guide ; lorsqu'un wagonnet veut passer il pousse l'extrémité recourbée du levier et dégage la voie.

Avec l'appareil suspendu de R. White, le passage des courbes s'effectue d'une façon toute spéciale : les câbles porteurs sont fixés sur le pylône et le câble tracteur contourne une petite poulie-guide.

La pince d'accouplement mobile permet d'effectuer des déviations allant jusqu'à 1/5, sans oscillations exagérées des wagonnets.

47. Stations terminales. — La construction des stations terminales dépend surtout du mode de chargement et de déchargement des wagonnets aériens et un peu du type d'appareil d'accouplement. La station de chargement la plus simple est celle d'un transporteur suffisamment incliné pour fonctionner sans moteur. Le câble tracteur s'enroule autour d'une poulie à gorges garnies de cuir, sur l'arbre de laquelle sont calées les poulies de frein généralement au nombre de deux. Lorsque les charges du chemin aérien déterminent un excédent de force considérable, on prévoit très souvent trois freins : le premier agit constamment, le deuxième sert à régler la marche et le troisième comme réserve.

Les caisses pleines sont souvent amenées de la carrière ou du lieu de chargement sur des trucs à voies étroites ; celles-ci arrivent jusque dans la station au-dessous des rails suspendus où elles sont légèrement inclinées pour permettre d'accrocher la caisse aux extrémités recourbées de la suspension. La figure 148 représente une construction de ce genre de la maison Carstens et Fabian. Lorsque les wagonnets sont lourds, il est difficile de les pousser même sur une rampe n'ayant que 10 à 12 centimètres de différence de niveau ; aussi dans ce cas munit-on les trucs d'un treuil pour soulever la caisse à l'accrochage. La figure 149 montre un truc de la firme précédente dans lequel le levage se fait à l'aide d'une manivelle et d'engrenages à crémaillère.

D'après la figure 148 on voit qu'avec un appareil d'accouplement fixé à la suspension, la construction des deux côtés de la station varie par suite de la disposition de la poulie à câble. Lorsque l'accouplement est sur le chariot, les stations sont absolument libres et on peut circuler partout, ce qui est un avantage assez appréciable. Si le câble tracteur a un effort considérable à supporter, on place encore sur l'arbre moteur une poulie folle et, dans le cas où la commande est combinée avec le tendeur automatique, on obtient la disposition de la figure 150.

Les stations de déchargement sont analogues aux précédentes. La figure 151 représente une telle construction de la maison Neyret-Bre-

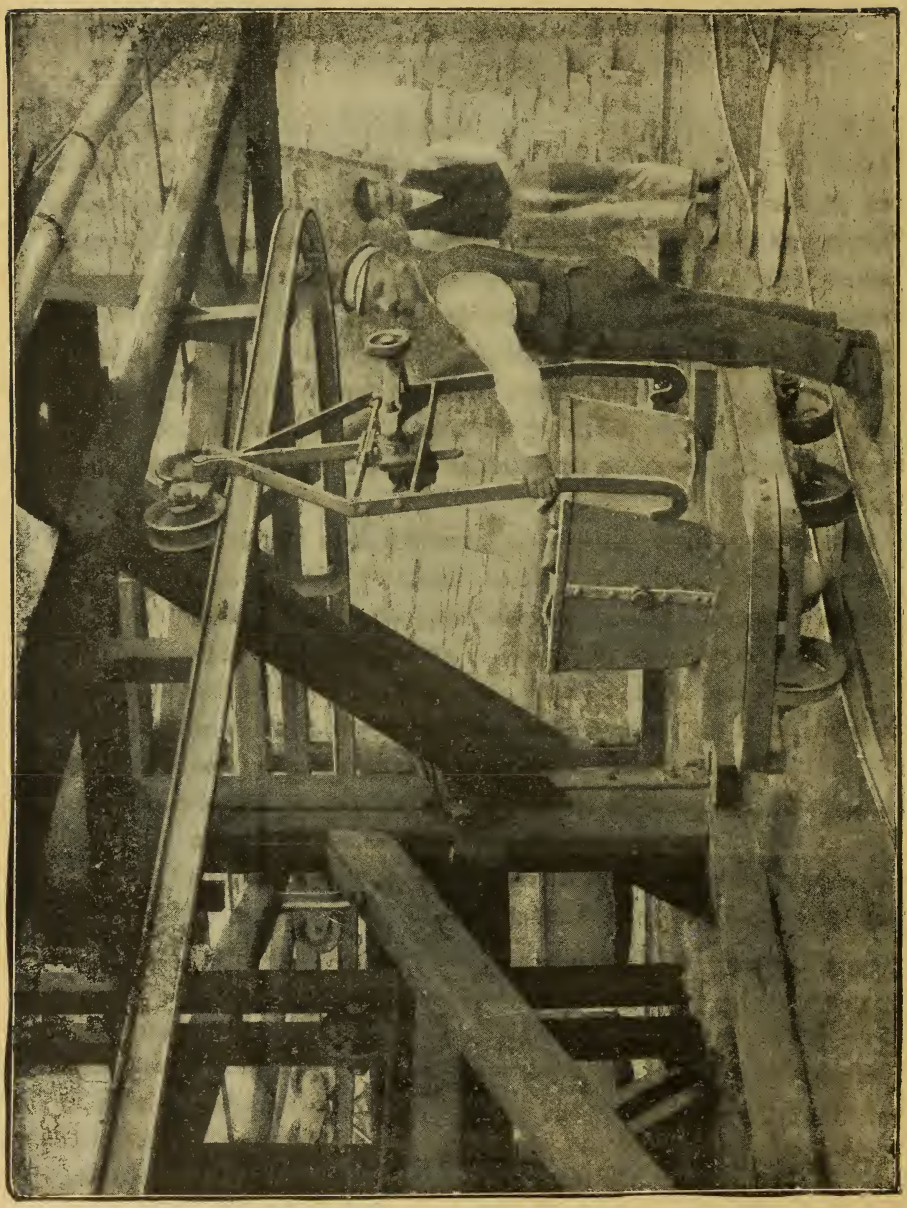


Fig. 148

nier et Cie avec accouplement sur la suspension. La poulie terminale se déplace et sert en même temps de tendeur. Comme course de la poulie

tendeuse, on prend généralement 3 mètres pour le premier kilomètre et 1 mètre de plus pour chacun des autres.

Afin d'avoir l'inclinaison voulue du câble tracteur, on dispose à l'entrée de la station une série de petits rouleaux, et le wagonnet soulève

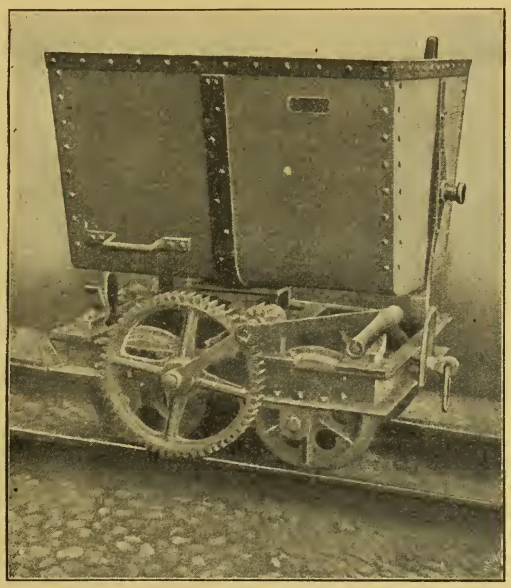


Fig. 149.

le câble de façon à ce que les mâchoires puissent passer au-dessus. Dans la station de la figure 152, la commande est combinée avec le ten-

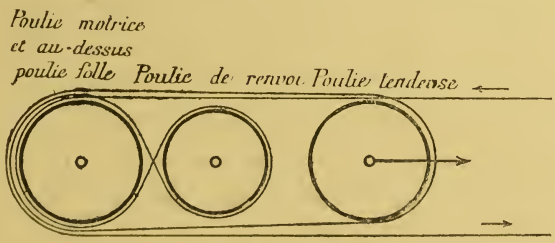


Fig. 150.

deur automatique comme nous l'avons représenté schématiquement (fig. 150), et l'accouplement est disposé à la partie supérieure du wagon-

net. Les câbles porteurs des deux stations, figures 151 et 152, sont ramenés ensemble vers l'axe du chemin aérien. Ad. Bleichert et Cie font généralement leurs déviations de câble à l'aide de coussinets spéciaux en fonte de grand rayon munis de rails de protection soigneusement travaillés.

Il arrive très souvent que les wagonnets ne font que contourner la

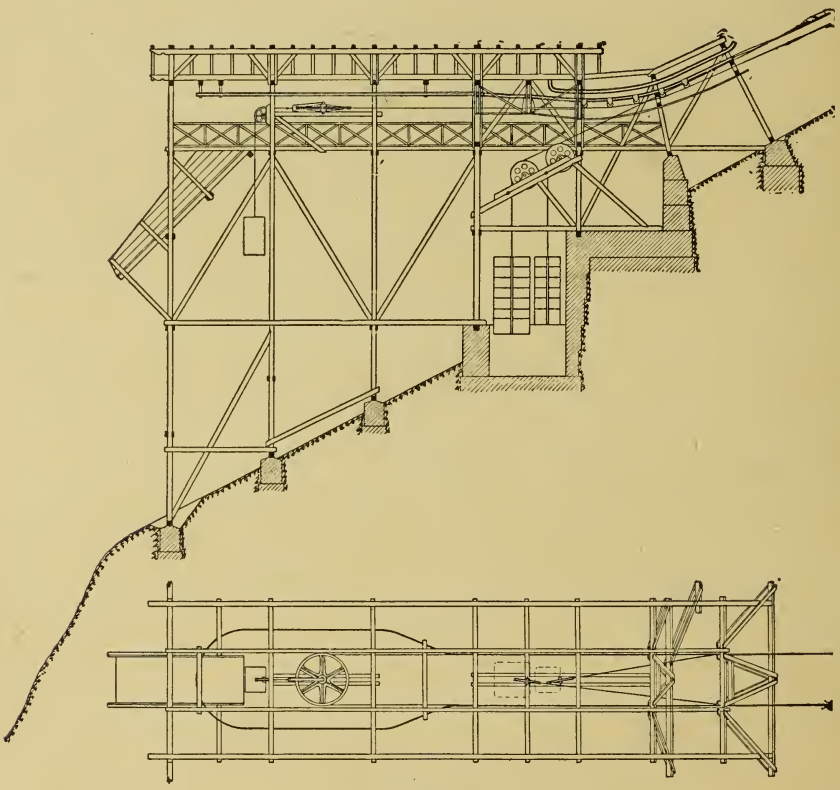


Fig. 151.

poulie de renvoi terminale, leur vidage ayant lieu en un point quelconque de la station. La figure 93 représente une station de ce genre : les wagonnets portant l'appareil d'accouplement à leur partie supérieure sont guidés par une série de petits galets disposés suivant une demi-circonférence d'environ 2 mètres de diamètre. On distingue également dans cette photographie les rails contre lesquels viennent appuyer les galets de pression de l'appareil d'accouplement. Il a déjà été construit des sta-

tions semblables à retour automatique qui atteignaient jusqu'à 40 mètres

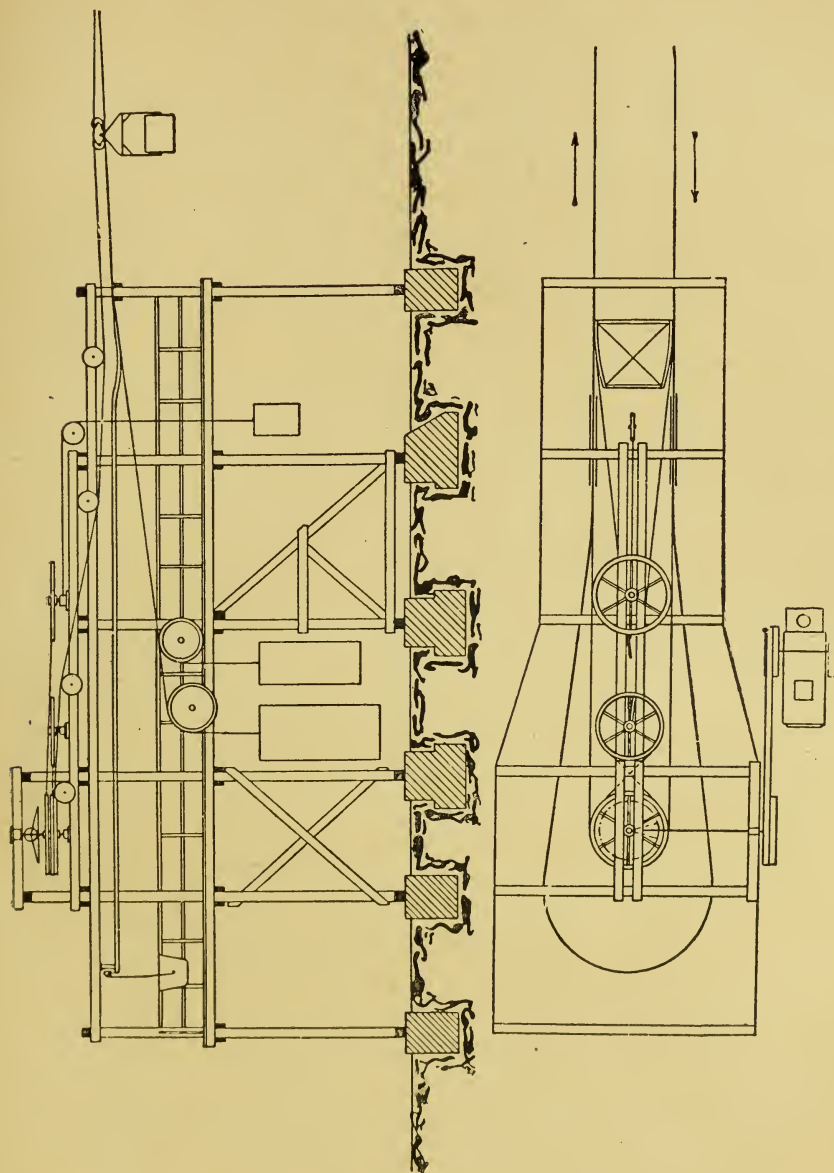


Fig. 152.

de hauteur, pour la formation de terrils. J. Pohlig en a établi une dont le premier pylône de 40 mètres de même hauteur que la construction

était à une distance de 250 mètres de celle-ci de façon à pouvoir déverser 450.000 mètres cubes de déchets de mine.

La figure 153 montre la station d'arrivée d'un transporteur aérien à mouvement continu construit par la maison Neyret-Brenier et Cie et destiné au chargement d'un Haut-Fourneau à l'usine de Fumel appartenant à la Société Métallurgique du Périgord. Dans cette installation les cha-

Fig. 153.

riots des wagonnets sont équipés électriquement de façon à se mouvoir d'eux-mêmes sur les voies suspendues disposées au-dessus de la plate-forme des gueulards.

La figure 154 représente une station de retour automatique avec appareil d'accouplement sur la suspension d'après Th. Otto et Cie. La commande est faite avec l'arbre que l'on voit à la partie avant de la figure, par l'intermédiaire d'engrenages coniques et droits. On peut encore remarquer les galets d'appui qui donnent au câble tracteur l'inclinaison voulue; ces rouleaux sont au nombre de trois et, dans le but de les faire disparaître au moment du passage d'un wagonnet, on les a disposés sur

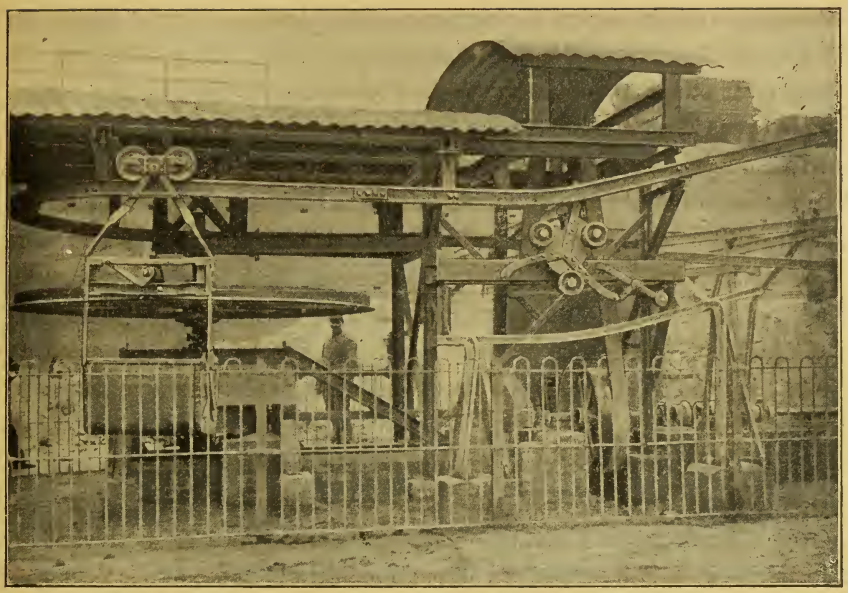


Fig. 154.

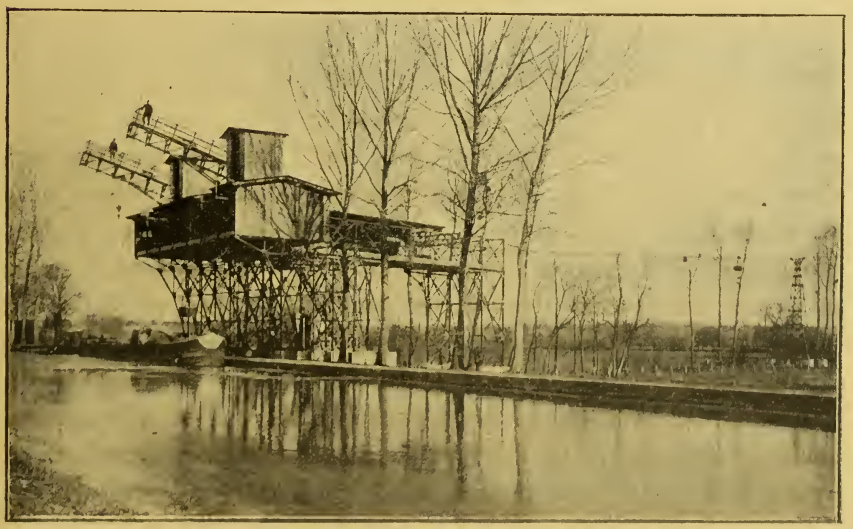


Fig. 155.

un disque articulé. Lorsqu'un wagonnet veut passer, il bute contre un levier et fait tourner le disque d'un tiers de tour; des guides ont été prévus pour empêcher les wagonnets d'osciller en cet endroit.

Dans le cas d'un chemin aérien fonctionnant de lui-même sans force motrice, on dispose avantageusement le frein dans la station supérieure et la poulie mobile du tendeur dans la station inférieure. On doit adopter la même disposition si le transport s'effectue de bas en haut et si l'on peut placer la commande dans la station supérieure. Dans le cas où par suite d'une transmission ou d'un moteur existant on doit mettre la poulie motrice à la partie inférieure, on combine la commande et le dispositif de tension ; la poulie disposée en haut sert alors seulement à renvoyer le câble tracteur.

La figure 155 montre une station de chargement installée par la maison Neyret-Brénier et Cie au bord du canal du centre, pour les aciéries d'Imphy. Cette station comprend deux grues fixes servant au déchargement de 200 tonnes par jour de matériaux arrivant par bateaux ; ces deux grues sont actionnées par le câble tracteur lui-même. Les wagonnets du transporteur arrivant en station sont descendus dans le bateau où la benne vide est remplacée par une pleine.

48. Stations intermédiaires. — Au début de la construction des chemins de fer aériens, le manque d'expérience et souvent l'insuffisance des capitaux dont on disposait étaient cause que les transporteurs de ce genre dépassaient rarement quelques kilomètres. De nos jours il en est tout autrement, et on a été conduit dans certaines régions montagneuses à construire des installations très importantes. La plus connue est celle exécutée par la maison Ad. Bleichert et Cie pour le gouvernement de la République Argentine. Ce transporteur aérien d'une longueur de 34^km^,4 qui a son point de départ dans les Cordillères à une hauteur d'environ 4500 mètres, est destiné à transporter le minerai de cuivre extrait des mines de Famatina jusqu'au chemin de fer. Cette longueur a été considérablement dépassée par Eichler et Co qui ont installé en Turkestan près de Samarkand un chemin aérien de 90 kilomètres, destiné au transport de charbon et de différentes autres matières.

Avec de telles distances, le câble tracteur n'est naturellement pas d'une

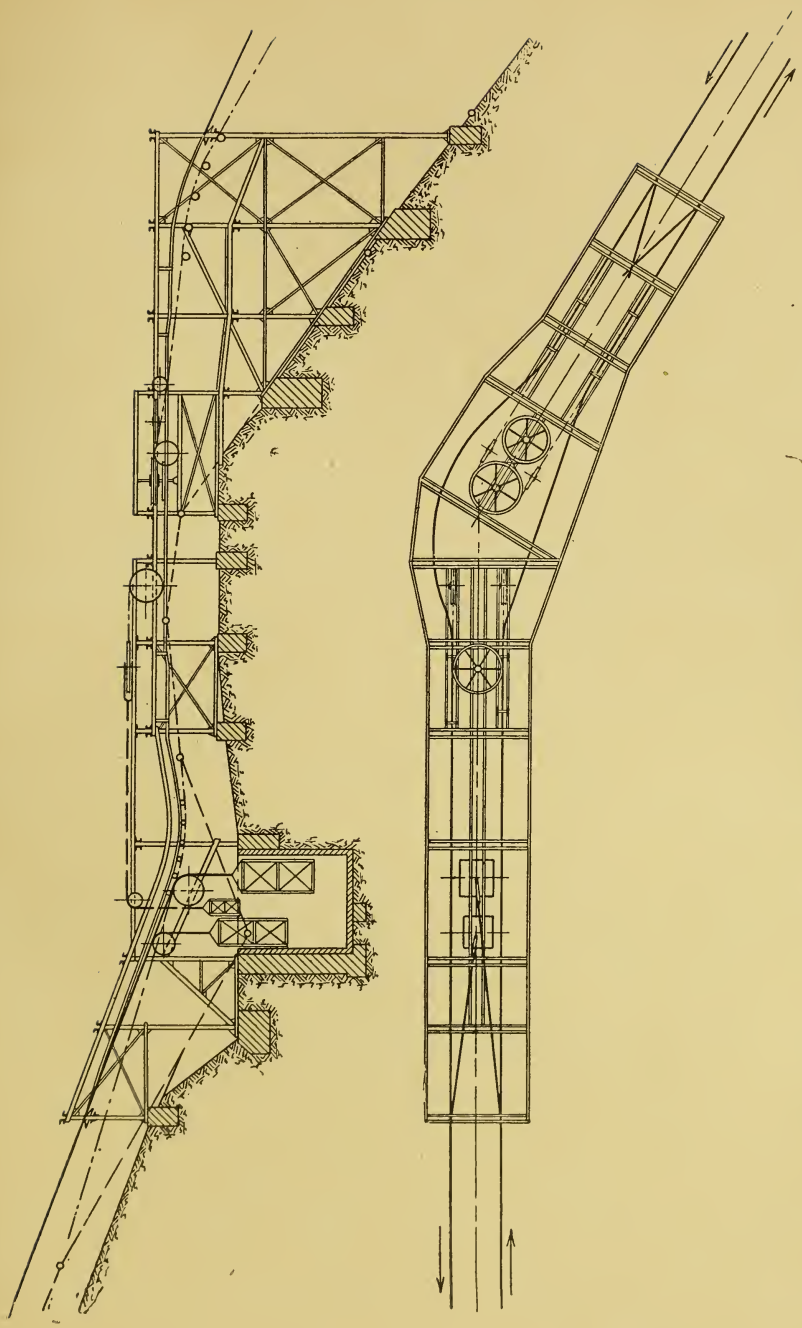


Fig. 156.

seule pièce, car au-dessus de 6 à 7 kilomètres on doit déjà le diviser en deux tronçons formant circuits indépendants ; on place alors les stations intermédiaires dans les brisures de la ligne, lorsque celles-ci sont nécessaires.

Cette disposition est très simple dans le cas d'un chemin aérien fonctionnant sous l'action des wagonnets descendants. La station supérieure correspond à une station de déchargement avec tendeurs des câbles porteurs et tracteurs, et la station inférieure à une station de chargement avec poulie de frein. La figure 156 représente un projet de Bleichert de ce genre dans lequel le frein doit fonctionner constamment.

Si, par suite du profil du terrain, le chemin aérien nécessite une commande par moteur à une extrémité, on établit une station intermédiaire avec liaison entre les deux câbles tracteurs. Dans les anciennes installations, le câble tracteur s'enroulait généralement autour d'une poulie terminale ; par l'intermédiaire d'engrenages coniques, celle-ci mettait en mouvement un arbre horizontal, lequel commandait le deuxième câble tracteur au moyen d'une autre paire d'engrenages.

On a presque complètement abandonné ce genre de construction cher et compliqué ; actuellement on dispose les poulies à câble des deux circuits sur un même arbre vertical comme le montre la figure 157 d'après Ceretti et Tanfani. Dans le présent cas, on a encore en plus une poulie de frein calée sur le même arbre ; cette installation fonctionne sans moteur, et pour sa mise en marche, il a été prévu une manivelle à bras avec engrenages coniques. Les autres détails sont les mêmes que ceux d'une station terminale. Les wagonnets y sont poussés à la main ; lorsque l'appareil d'accouplement fonctionne automatiquement, on peut donner aux rails suspendus une inclinaison de $\frac{1}{50}$, les wagonnets roulent alors d'eux-mêmes sous l'action de leur propre poids et de leur vitesse acquise du décrochage jusqu'à l'accrochage. On doit naturellement éviter les coudes brusques tels que ceux de la figure 157, ce qui est très facile en employant des appareils avec câble tracteur à la partie supérieure.

Les stations intermédiaires sont nécessaires dans un chemin aérien d'assez grande longueur présentant des pentes rapides, car en n'employant qu'un seul câble, on serait conduit à un diamètre considérable et

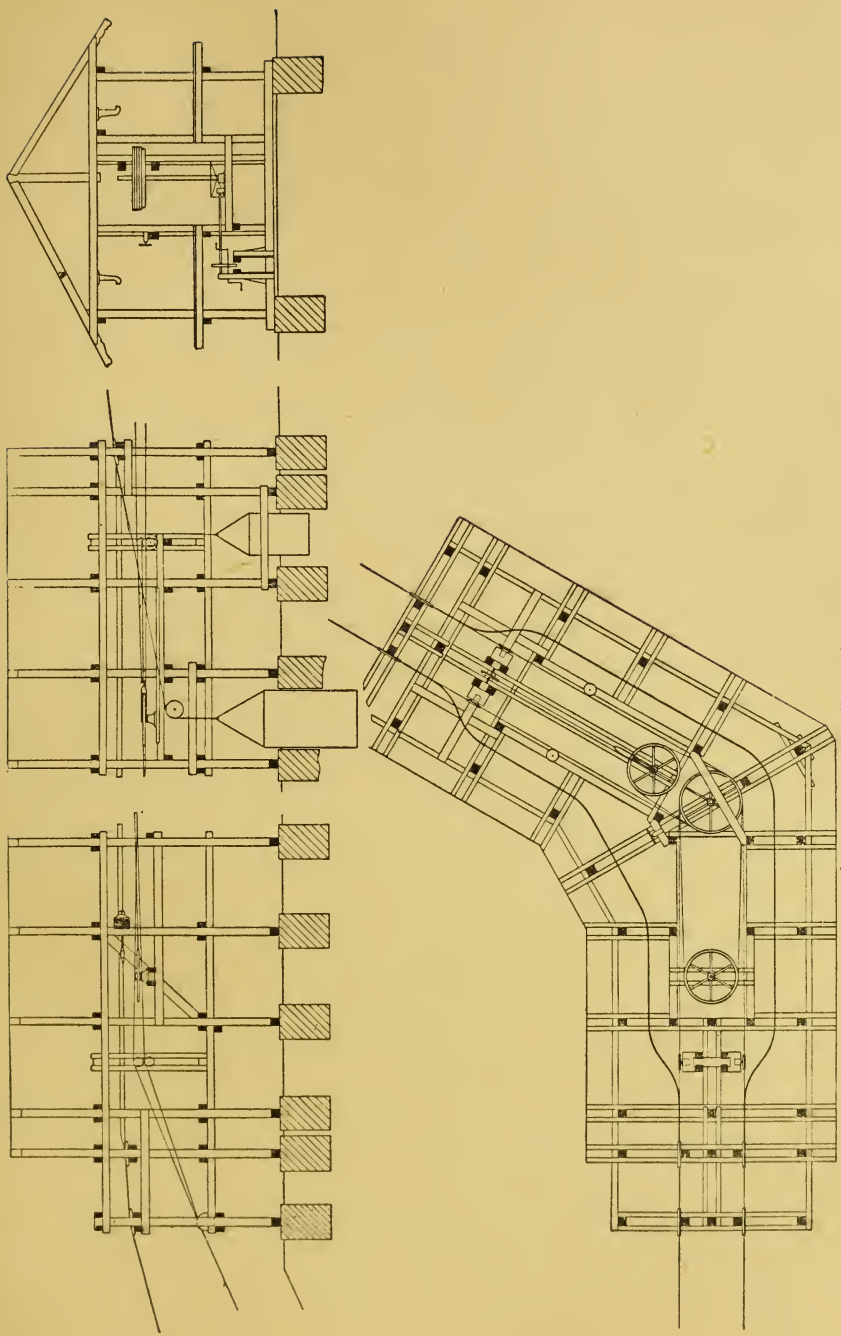


Fig. 157.

à un dispositif de tension très long. Dans un transporteur aérien avec deux câbles tracteurs distincts, celui qui ne s'enroule pas autour de la poulie motrice peut être plus faible que l'autre et lorsque la commande se trouve dans la station intermédiaire on peut réaliser une économie sur les deux câbles. Avec des conditions de terrain favorables J. Pohlig a déjà installé des chemins aériens avec un seul câble tracteur de 10 kilomètres de longueur.

Il arrive parfois qu'ayant à transporter diverses matières, dans des endroits différents, on doit établir un embranchement, sur la ligne. On construit alors la station intermédiaire, de sorte que tous les wagonnets se décrochent en arrivant pour être ensuite poussés à la main soit sur le prolongement de leur premier parcours soit sur l'embranchement. Il est avantageux d'enrouler les trois câbles tracteurs sur trois poulies montées sur le même arbre, ce qui donne une station intermédiaire ordinaire avec une arrivée et deux sorties.

Lorsque l'installation ne fonctionne pas automatiquement, on a parfois avantage à raccorder l'embranchement dans une autre station. Le câble tracteur de la ligne principale ne forme alors qu'un circuit et les wagonnets sont désaccouplés par un dispositif de décrochage mobile lorsqu'ils doivent être dirigés vers l'embranchement. L'établissement de ce décrochage se fait assez facilement avec la plupart des appareils. En employant un accouplement à vis, on doit pousser la construction métallique entière de la figure 113 en dehors de la voie des wagonnets. Lorsqu'on a les rails d'accouplement des figures 122, 123 et 125, ceux-ci doivent être articulés et le câble tracteur doit pouvoir s'enlever des rouleaux-guides. Les appareils les mieux appropriés pour ces décrochages sont ceux avec mâchoires s'ouvrant sur le côté. On met les rails accoupleurs hors circuit en les faisant tourner autour de deux axes placés quelques centimètres en dessous ; les rouleaux-guides du câble tracteur sont dans ce cas reliés au rail mobile. Une fois le dispositif d'accouplement mis en place, aucun ouvrier n'est nécessaire dans cette station.

49. Vitesse du câble tracteur. — Avec les appareils d'accouplement manœuvrés à la main, la vitesse du câble tracteur ne doit pas dépasser autant que possible $1^{m},50$ à la seconde, car autrement les wagonnets se-

raient arrachés trop brusquement des mains de l'ouvrier et par suite les mâchoires ne seraient pas suffisamment serrées l'une contre l'autre. Lorsqu'on eut introduit dans la construction les accouplements automatiques à vis, on maintint pendant longtemps cette vitesse, car le choc du gros contrepoids placé au bout du levier d'accouplement contre les rails inclinés était assez considérable.

Aussitôt après l'apparition des appareils s'accrochant sous l'action du poids propre du wagonnet, on porta la vitesse à $2^m,50$ et même parfois à 3 mètres à la seconde, car avec ce dispositif les rails d'accouplement sont tellement peu inclinés que l'accrochage s'effectue presque sans choc, même dans le cas de grandes vitesses. On a également augmenté par suite la vitesse des transporteurs avec accouplement à vis qui actuellement atteint très souvent 2 mètres et $2^m,50$ à la seconde.

En général les grandes vitesses ne sont recommandables que dans les chemins aériens d'une certaine longueur ayant peu de wagonnets sur leurs parcours. Dans les installations relativement courtes on ne doit pas choisir une grande vitesse afin d'obtenir un travail facile dans les stations terminales.

Lorsque le câble tracteur contourne des poulies-guide, comme dans les stations d'angle automatiques, on donne avantageusement au câble tracteur une faible vitesse pour avoir une station de rayon et de longueur moindres, et par suite moins coûteuse. Les conditions d'établissement d'une telle station ont déjà été indiquées au chapitre 46. Lorsque le câble contourne une poulie de 2 mètres de rayon, il ne faut pas dépasser $0^m,75$ à la seconde si on ne veut pas que la partie inférieure de la caisse du wagonnet oscille de plus de 5 centimètres. Avec une vitesse de 1 mètre à la seconde, il est déjà nécessaire d'avoir une poulie de $3^m,65$ de rayon ou d'employer des guidages spéciaux pour la caisse du wagonnet.

50. Diamètre du câble tracteur et force motrice. — Pour déterminer le diamètre du câble tracteur, on applique les égalités du chapitre 17. On obtiendra un aperçu des relations qui donnent ce diamètre en effectuant quelques exemples.

Nous allons calculer le diamètre du câble tracteur et l'excédent de force que l'on doit freiner dans l'installation représentée en profil longi-

tudinal par la figure 1 de la planche I. Le tableau de la page suivante donne l'écartement des pylônes et leur hauteur. Le transport de la partie supérieure à la partie inférieure est de 20 tonnes à l'heure, les charges utiles sont de $P = 600$ kilogrammes, le poids propre des wagonnets est $p = 160$ kilogrammes et la vitesse du câble tracteur $v = 1^{m},50$ à la seconde.

Le contrepoids tendeur $G = 800$ kilogrammes est disposé dans la station inférieure, de telle sorte que la tension la plus faible du câble tracteur est $S = 400$ kilogrammes. Elle varie généralement entre 300 et 500 kilogrammes, suivant le diamètre du câble.

Si l'on ne tient pas compte de l'influence des surélévations du profil, l'équation du chapitre 17 donne comme tension à la poulie du frein du côté des wagonnets pleins :

$$S_1 = S + Q\left[\frac{q}{Q} + \frac{0,278}{v}\left(1 + \frac{p}{P}\right)\right].(h - \mu l)$$

dans laquelle on donne à μ, qui doit être retranché, la valeur minimum $\frac{1}{100}$.

On effectue les calculs la plupart du temps avec cette équation simplifiée, elle ne donne cependant dans le présent cas qu'un résultat approché. En admettant un câble tracteur de diamètre $d = 1^{cm},8$, le poids par mètre courant sera $q = 1^{kg},27$, et :

$$S_1 = 400 + 20\left[\frac{1,27}{20} + \frac{0,278}{1,5}\left(1 + \frac{160}{350}\right)\right]\left(411,7 - \frac{3589}{100}\right)$$

ou

$$S_1 = 400 + 5,96 \times 375,8 = 2640 \text{ kilogrammes.}$$

Pour effectuer le calcul exact d'après l'équation complète on doit diviser la ligne en différents tronçons, par exemple : *a* (n° 36 à 28), *b* (28 à 13), *c* (13 à 7), *d* (7 à 0). La division est déterminée sur la surélévation supérieure par la tension maximum du câble. En rem-

Pylône No	Abscisses l en m	Intervalles a en m	Hauteurs h en m	Différences de hauteur b en m
0	40,8		411,7	
1	239,5		409,2	
2	378,2		414,8	
3	660,1		436,1	
4	701,5		438,0	
		12,0		1,5
5	713,5		439,5	
		14,5		0,9
6	728,0		440,4	
		17,4		0,9
7	745,4		441,3	
		9,2		1,0
8	754,6		440,3	
		12,7		2,5
9	767,3		437,8	
		12,7		2,8
10	779,0		435,0	
		17,6		5,0
11	796,4		430,0	
12	813,7		422,7	
13	838,2		415,6	
14	1 690,2		185,8	
15	1 719,9		179,0	
16	1 751,5		171,8	
17	1 801,2		164,1	
18	1 859,8		153,1	
19	1 925,2		141,4	
20	2 000,0	2 191,8	132,0	346,9
21	2 108,7		118,1	
22	2 225,1		107,4	
23	2 502,9		85,7	
24	2 708,7		84,4	
25	2 754,1		84,0	
26	2 802,4		79,2	
27	3 030,0		68,7	
28	3 296,7		69,6	
		63,1		1,0
29	3 359,8		70,6	
		7,6		0
30	3 367,4		70,6	
		11,4		0,1
31	3 378,8		70,5	
		11,5		0,9
32	3 390,3		69,6	
		10,8		3,6
33	3 401,1		66,0	
		9,4		5,3
34	3 420,5		61,6	
		10,2		5,8
35	3 430,7		55,8	
36	3 630,0		0	

plaçant les quantités correspondantes par leur valeur avec $\mu_r \backsim 0{,}006$ et :

$$\frac{4\xi}{D} = \frac{4 \times 0{,}015 \times 0{,}018}{0{,}3} \backsim 0{,}0036.$$

$$S_a = 400\left[1 - 0{,}006\left(\frac{5{,}8}{10{,}2} - \frac{1{,}0}{63{,}1}\right) - 0{,}0036 \times 8\right]$$

$$+ 5{,}96\left[69{,}6 - \frac{333{,}3}{100} - 0{,}0036 \times 70{,}6 - 0{,}006\left(\frac{1{,}0}{63{,}1} \times 70{,}6\right.\right.$$

$$\left.\left. - \frac{5{,}8}{10{,}2} \times 61{,}6 - \left(\frac{5{,}3^2}{9{,}4} + \frac{3{,}6^2}{10{,}8} + \frac{0{,}9^2}{11{,}5} + \frac{0{,}1^2}{11{,}4} + \frac{0}{7{,}6}\right)\right)\right]$$

$$S_a = 400(1 - 0{,}0033 - 0{,}0288) + 5{,}96(69{,}6 - 3{,}33 - 0{,}25 - 0{,}23)$$
$$= 387 + 392 \backsim 780 \text{ kilogrammes.}$$

On aura alors pour l'extrémité du deuxième tronçon, qui ne présente aucune surélévation :

$$S_b = 780(1 - 0{,}0036 \times 15) + 5{,}96\left(346{,}9 - \frac{2\,191{,}8}{100}\right)$$
$$= 738 + 1\,937 = 2\,675 \text{ kilogrammes.}$$

En outre :

$$S_c = 2\,675\left[1 - 0{,}006\left(\frac{5{,}0}{17{,}6} - \frac{0{,}9}{17{,}4}\right) - 0{,}0036 \times 6\right]$$

$$+ 5{,}96\left[25{,}7 - \frac{92{,}8}{100} - 0{,}0036 \times 0\right.$$

$$\left. - 0{,}006\left(0 - \frac{5{,}0}{17{,}6} \times 19{,}4 - \left(\frac{2{,}8^2}{12{,}7} + \frac{2{,}5^2}{12{,}7} + \frac{1^2}{9{,}2}\right)\right)\right]$$

$$S_c = 2\,675(1 - 0{,}001 - 0{,}022) + 5{,}96(25{,}7 - 0{,}93 - 0 + 0{,}04)$$
$$= 2\,613 + 148 \backsim 2\,760 \text{ kilogrammes,}$$

et finalement :

$$S_d = 2\,760\left[1 - 0{,}006\left(\frac{0{,}9}{14{,}5} - \frac{1{,}5}{12{,}0}\right) - 0{,}0036 \times 6\right]$$

$$+ 5{,}96\left[- 29{,}6 - \frac{687{,}2}{100} - 0{,}0036 \times 27{,}8\right.$$

$$\left. - 0{,}006\left(\frac{1{,}5}{12{,}0} \times 27{,}8 - \frac{0{,}9}{14{,}5} \times 0{,}9 - 0\right)\right]$$

$$S_d = 2\,760(1 - 0 - 0{,}022) + 5{,}96(- 29{,}6 - 6{,}87 - 0{,}10 - 0{,}02)$$
$$= 2\,700 - 220 = 2\,480 \text{ kilogrammes}$$

Pour le câble des wagonnets vides on aura de la même façon avec :

$$A_2 = 20\left(\frac{1,27}{20} + \frac{0,278}{1,5} \times \frac{160}{600}\right) = 2,26$$

$$S'_a = 400(1 + 0,003 + 0,029) + 2,26(69,6 + 3,33 + 0,25 + 0,23)$$
$$= 413 + 166 \backsim 580 \text{ kilogrammes.}$$
$$S'_b = 580(1 + 0,054) + 2,26(346,9 + 21,9)$$
$$= 612 + 834 = 1\,446 \text{ kilogrammes.}$$
$$S'_c = 1\,446(1 + 0,001 + 0,022) + 2,26(25,7 + 0,93 + 0 - 0,04)$$
$$= 1\,479 + 60 \backsim 1\,540 \text{ kilogrammes.}$$
$$S'_d = 1\,540(1 + 0 + 0,022) + 2,26(-29,6 + 6,87 + 0,10 + 0,02)$$
$$= 1\,575 - 51 \backsim 1\,525 \text{ kilogrammes.}$$

La formule simplifiée employée ordinairement aurait donné :

$$S'_1 = 400 + 2,26 \times 375,8 = 1\,250 \text{ kilogrammes.}$$

La force que l'on doit freiner ainsi obtenue est :

$$N = \frac{(S_1 - S'_1)v}{75} = \frac{(2\,640 - 1\,250)1,5}{75} = 27,8 \text{ H.P.}$$

tandis que le calcul exact donne :

$$N = \frac{(2\,480 - 1\,525)1,5}{75} = 19,1 \text{ H.P..}$$

Le rapport des deux tensions à la poulie de frein :

$$\frac{S_1}{S'_1} = \frac{2\,480}{1\,525} = 1,63$$

arrive très près de la limite admissible 1,65 pour un simple enroulement autour d'une demi-poulie à gorge garnie de cuir. Pour avoir plus de sécurité, on augmentera le contrepoids inférieur de 100 à 150 kilogrammes.

Dans le calcul du diamètre du câble tracteur, on prend ordinairement pour la ligne une sécurité $\Delta = 7$ et pour la tension maximum une charge de rupture de l'acier $K_z = 15\,000$ kilogrammes par centimètre carré.

La tension augmentant de 50 kilogrammes, on obtient une section de câble :

$$F = \frac{S_t \Delta}{K_z} = \frac{(2\,760 + 50)7}{15\,000} = 1^{cm2},32$$

correspondant à un diamètre $d = 1^{cm},8$ avec des fils de 2 millimètres.

Lorsque le câble contourne une poulie de 2 mètres de diamètre, un fil supporte un effort de flexion de :

$$k_b = \beta E \frac{\delta}{D} = 0,36 \times 2\,200\,000 \frac{2}{2\,000} \backsim 790 \text{ kg/cm}^2,$$

auquel s'ajoute l'effort de traction :

$$k_z = \frac{S_c}{F} = \frac{2\,760 + 50}{1,32} \backsim 2\,130 \text{ kg/cm}^2,$$

de telle sorte que la fatigue totale est :

$$k_b + k_z = 790 + 2\,130 = 2\,920 \text{ kg/cm}^2;$$

le coefficient réel de sécurité est alors :

$$\Delta = \frac{K_z}{k_b + k_z} = \frac{15\,000}{2\,920} = 5,1.$$

Nous allons effectuer le même calcul pour une installation dont la longueur totale $l = 4\,400$ mètres, $h = 170$ mètres, avec une pente presque régulière et sans résistances de câble sur les rouleaux porteurs. La commande et le tendeur automatique sont réunis dans la station inférieure ; pour les autres quantités, nous conservons les mêmes valeurs que dans le premier exemple, sauf le débit Q qui est de 32 tonnes à l'heure avec des charges utiles P de 350 kilogrammes chacune.

Le contrepoids G = 800 kilogrammes détermine dans la partie supérieure du brin qui entraîne les wagonnets pleins une tension initiale S = 400 kilogrammes. La tension à l'autre extrémité dans la deuxième station est :

$$S_1 = S\left(1 + \frac{4\xi z}{D}\right) + Q\left[\frac{q}{Q} + \frac{0,278}{v}\left(1 + \frac{p}{P}\right)\right](h + \mu l).$$

Dans ce cas là on donnera avantageusement à μ qui est positif sa valeur maximum $\frac{1}{70}$, on admettra en outre un câble de diamètre $d = 1^{cm},8$ et $q = 1^{kg},27$ par mètre. On aura alors en supposant 45 pylônes :

$$S_1 = 400(1 + 0,0036 \times 45) + 32\left[\frac{1,27}{32} + \frac{0,278}{1,5}\left(1 + \frac{160}{350}\right)\right]\left(170 + \frac{4\,400}{70}\right)$$

ou

$$S_1 = 465 + 2\,320 = 2\,785 \text{ kilogrammes.}$$

La tension dans le brin montant est à la partie inférieure :

$$S'_1 = S_1\left(1 - \frac{4\xi z}{D}\right) - Q\left(\frac{q}{Q} + \frac{0.278}{v} \times \frac{p}{P}\right)(h - \mu l).$$

Quoique les wagonnets vides descendent la ligne, nous effectuerons les calculs pour le second côté dans les mêmes conditions que ceux du premier avec $\mu = \frac{1}{70}$.

On aura alors :

$$S'_1 = 2\,280 - 430 = 1\,850 \text{ kilogrammes.}$$

La tension maximum correspond à celle de l'exemple précédent, de sorte que la supposition $d = 1^{cm},8$ est admissible.

La force motrice nécessaire est dans ce cas :

$$N = (S'_1 - S)\,\frac{v}{75} = (1\,850 - 400)\frac{1,5}{75} \backsim 29 \text{ H.P.}$$

qui est portée à 30 H.P. si l'on tient compte des frottements dans les stations. Le rapport des tensions des deux brins à la station motrice

$$\frac{S'_1}{S} = \frac{1\,850}{400} = 4,63$$

exige une poulie motrice à trois gorges et une poulie de renvoi à deux gorges, mais sans garniture en cuir.

51. Ponts-abris et filets protecteurs. — Lorsqu'un chemin de fer aérien traverse une voie ferrée, une route ou autre passage public, il est nécessaire de protéger la voie contre la chute éventuelle d'un morceau de la matière que l'on transporte. Dans ce but, on construit généralement des ponts-abris en bois de 4 mètres à $4^m,50$ de large, très souvent reliés à un pylône, comme le montre la figure 158, d'après une construction de la maison Th. Otto et C°. Afin d'obtenir une sécurité absolument complète, on garnit avec des planches les deux côtés de la partie supérieure traversée par les wagonnets. Une disposition très avantageuse consiste à

placer les planches en lames de persiennes comme le représente la figure

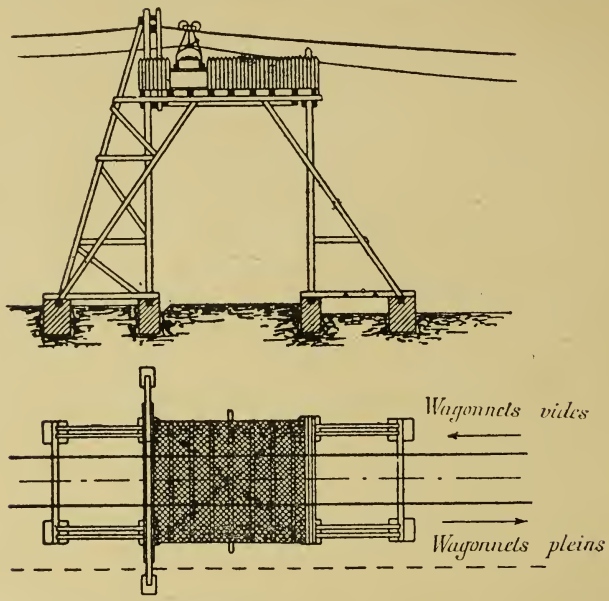


Fig. 158.

Fig. 159.

159 ; les espaces étant suffisamment grands pour laisser passer le vent.

Ce pont a été construit par la maison Bullivant et C°. La meilleure protection latérale est constituée par un grillage métallique.

Dans le cas d'une voie étroite, la construction en tôle ondulée bombée de J. Pohlig et C° (fig. 160) est souvent suffisante. En Hongrie les admi-

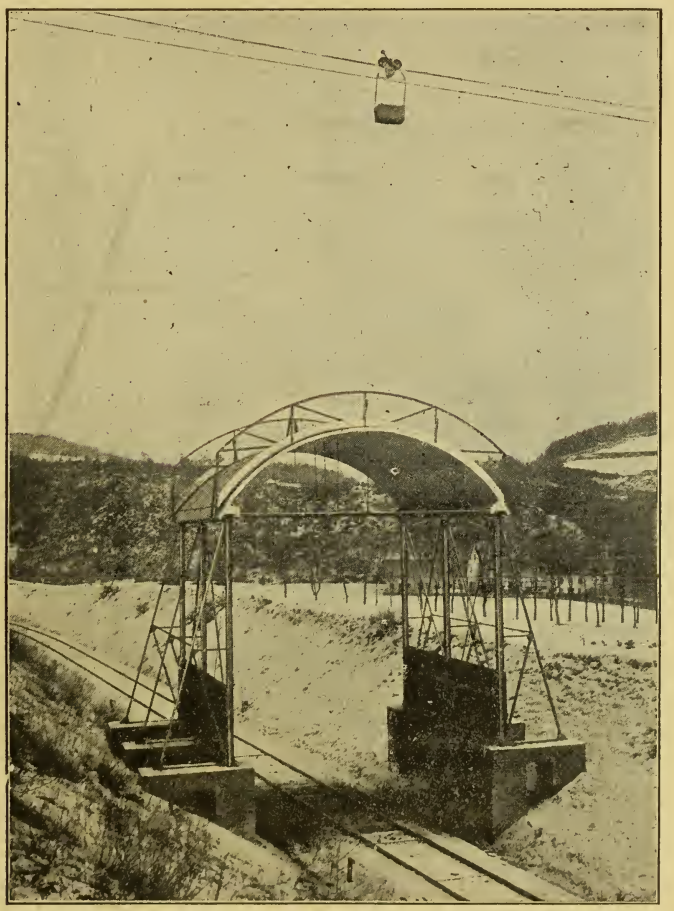


Fig. 160.

nistrations sont très exigeantes : le plancher doit être recouvert d'environ 50 centimètres de terre, de sorte que lorsque les câbles porteurs sont un peu haut, le prix d'un pont est 6 fois plus élevé que celui d'une construction ordinaire.

Lorsqu'on utilise les ponts comme pylônes, tel est le cas de la figure 158, il est parfois nécessaire de supporter lès câbles aux deux extrémités, pour que les wagonnets ne viennent pas rencontrer le plancher. Le pont métallique (fig. 161), construit par J. Pohlig et C°, possède même trois supports avec rouleaux porteurs du câble tracteur : un à chaque extrémité et un au milieu. Le poids d'un pont-abri ordinaire de 15 à 20 mètres de portée est d'environ 1 000 kilogrammes par mètre.

Lorsque le chemin aérien traverse une cour d'usine ou une route sous un angle très faible on dispose souvent au-dessous de la ligne un filet

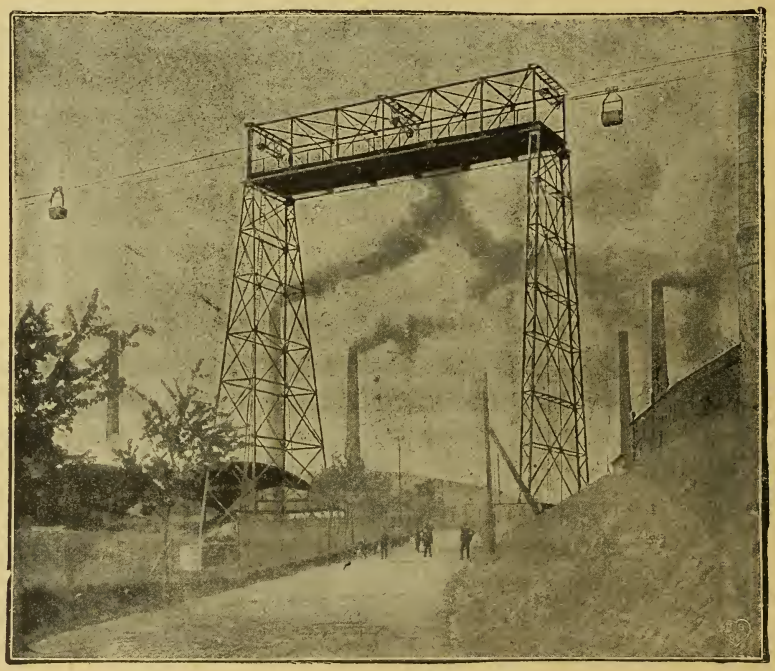


Fig. 161.

avec une flèche qui est la plupart du temps de 5 à 6 % de sa longueur. Ce dispositif de protection est supporté par 2 ou 3 câbles spiroïdaux maintenus à écartement constant par des entretoises en fer T placées tous les 5 à 7 mètres et sur ces câbles on place un filet d'environ 40 millimètres d'ouverture de maille en fil de 2 millimètres. Lorsqu'on a des chocs considérables à craindre on emploie deux filets : le premier résistant, de

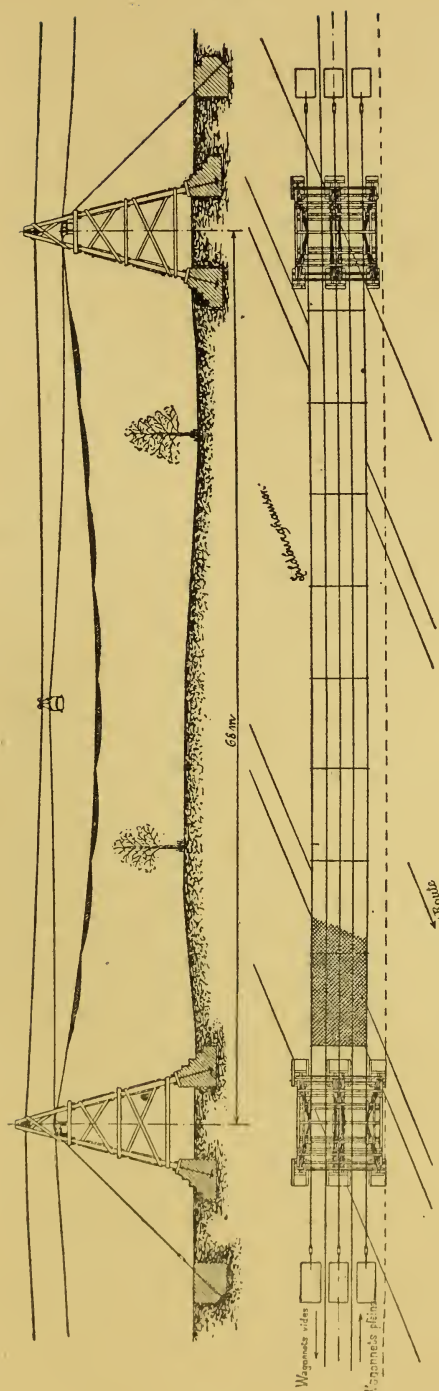

68 mr
Schlangenlinie
Route
Wagonnets vides
Wagonnets pleins

Fig. 162.

80 à 100 millimètres d'ouverture de maille et le second d'environ 20 millimètres. La figure 162 donne les détails de construction d'un tel filet protecteur d'après Th. Otto et C°.

Nous allons effectuer ci-après le calcul de ce filet de 68 mètres de longueur, $4^m,30$ de largeur et divisé en 10 parties de $6^m,80$ chacune.

Avec une ouverture de maille de 40 millimètres et des fils de 2 millimètres, un mètre carré aura $\frac{1\,000}{40} \times 2 = 50$ fils d'environ $1^m,10$ de longueur, et le poids par mètre carré sera $1^{kg},33$. Comme les deux dernières divisions ne sont pas recouvertes, le poids total du filet est :

$$G_1 = 8 \times 6,8 \times 4,3 \times 1,33 \backsim 310 \text{ kilogrammes.}$$

le poids des entretoises en T :

$$G_2 = 9(4,3 + 0,1) \times 4,42 = 175 \text{ kilogrammes.}$$

Les trois câbles de construction spiroïdale qui ont généralement 25 millimètres de diamètre pèsent :

$$G_3 = 3 \times 68 \times 3,13 = 640 \text{ kilogrammes.}$$

A ces différents poids, il faut encore ajouter la charge de la neige à raison de 75 kilogrammes par mètre carré, ce qui donne sur toute la longueur :

$$G_4 = 8 \times 6,8 \times 4,3 \times 75 = 17\,550 \text{ kilogrammes.}$$

La charge maximum est donc :

$$G = 18\,700 \text{ kilogrammes.}$$

En admettant un coefficient de sécurité égal à 3, on aura d'après l'égalité (10 *a*), au milieu du filet une flèche :

$$f = \frac{a^2}{8\,\frac{R}{\Delta}} = \frac{68^2 \times 3}{8 \times 17\,400} = 4 \text{ mètres.}$$

La charge sur un mètre de longueur de câble étant :

$$q = \frac{18\,700}{3 \times 8 \times 6,8} = 114 \text{ kilogrammes,}$$

la tension horizontale du câble est alors :

$$H = \frac{qa^2}{8f} = \frac{114 \times 68^2}{8 \times 4} = 16\,500 \text{ kilogrammes.}$$

L'angle que fait le câble avec l'horizontale est déterminé par la relation :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2f}{\frac{1}{2}a} = \frac{4 \times 4}{68} = 0{,}118$$

d'où

$$\cos \alpha = 0{,}94 \text{ et } \sin \alpha \backsim 0{,}11.$$

La tension maximum du câble est :

$$S = \frac{H}{\cos \alpha} = \frac{16\,500}{0{,}94} = 17\,600 \text{ kilogrammes.}$$

Cette force détermine la section d'un câble et dans le cas d'acier très résistant on prend :

$$F = \frac{S\Delta}{K_z} = \frac{17\,600 \times 3}{14\,500} = 3^{\text{cmq}},64$$

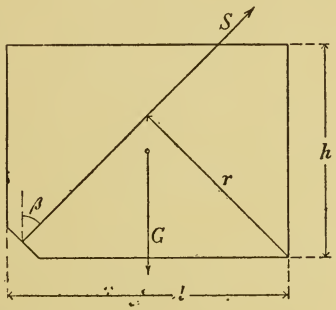


Fig. 163.

on admettra donc un câble de 25 millimètres de diamètre correspondant à une section de $3^{\text{cmq}},73$.

Le massif en maçonnerie auquel sont ancrés les câbles (fig. 163) doit être suffisamment lourd pour ne pas être soulevé :

$$G = \Delta S \cos \beta$$

en outre le frottement de ce bloc doit empêcher son glissement et pour cela il faut avoir :

$$\mu (G - S \cos \beta) = \Delta' \times S \sin \beta.$$

En remplaçant dans cette seconde égalité G par sa valeur tirée de la première, on aura :

$$\mu S \cos \beta (\Delta - 1) = \Delta' S \sin \beta$$

l'angle que peut faire le câble avec la verticale est donné par :

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\mu (\Delta - 1)}{\Delta'} = \frac{0{,}65\ (3 - 1)}{1{,}5} = 0{,}87$$

et $\beta = 41°$; nous avons supposé un bon sol sablonneux sec et tenu compte de la terre placée devant le massif en posant : $\Delta' = \frac{\Delta}{2}$.

Le bloc a été exécuté avec $\operatorname{tg} \beta = 0{,}97$, c'est-à-dire $\sin \beta \backsim 0{,}70$ et $\cos \beta = 0{,}72$; dans ces conditions son poids est :

$$G = 17\,600 \left(\frac{1{,}5}{0{,}65} \times 0{,}70 + 0{,}72\right) = 41\,000 \text{ kilogrammes.}$$

Avec un poids spécifique $\gamma = 2\,000$ kilogrammes par mc. on a :

$$h = 3 \text{ mètres}, \quad l = 3^{m},80, \quad b = 1^{m},80.$$

La sécurité contre le renversement est un peu faible et l'égalité des moments $G \frac{l}{2} = \Delta' S r$ donne, après avoir remplacé G et r par leurs valeurs :

$$\Delta S \cos \beta \frac{l}{2} = \Delta' S l \cos \beta$$

d'où

$$\Delta' = \frac{\Delta}{2} = 1{,}5$$

comme plus haut, ce qui est suffisant, car on n'a pas tenu compte de l'action de la terre qui se trouve devant le massif.

La pression d'appui est relativement peu importante et n'a pas besoin d'être calculée.

Les pylônes ont à supporter l'effort vertical :

$$P_1 = 3S (\sin \alpha + \cos \beta) = 3 \times 0{,}83 \times 17\,600 = 43\,800 \text{ kilogrammes}$$

et la poussée horizontale

$$P_2 = 3S (\cos \alpha - \sin \beta) = 3 \times 0{,}24 \times 17\,600 = 12\,700 \text{ kilogrammes.}$$

Leur calcul correspond à celui indiqué chapitre 37.

La figure 164 représente un filet au-dessus du chemin de fer de la Compagnie de l'Est dans une installation automotrice construite par Ceretti et Tanfani pour l'exploitation d'une carrière de pierres meulières.

La figure 165 montre un pont suspendu construit par la maison

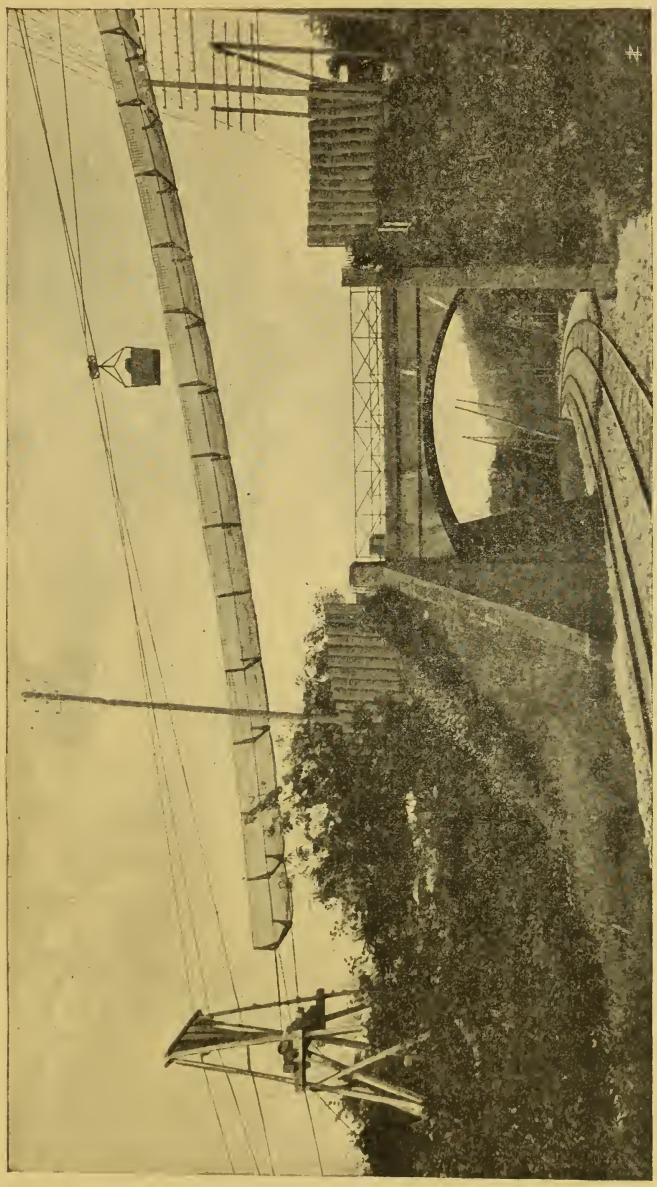


Fig. 164.

Th. Otto et Cᵉ et destiné à protéger une gare ; une de ses extrémités est combinée avec la station de déchargement.

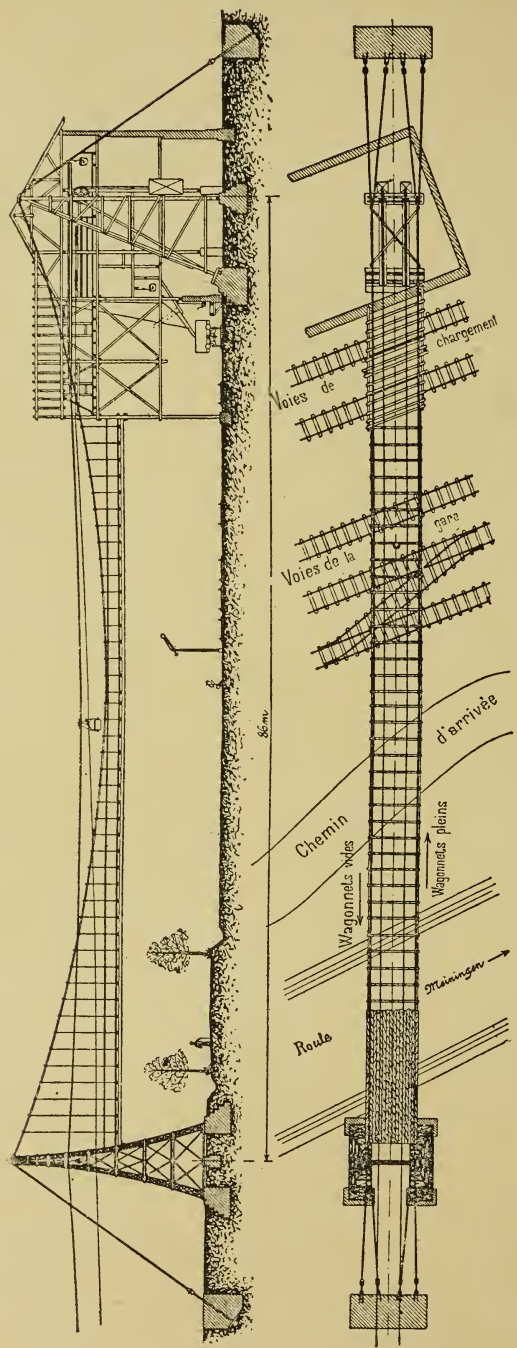

Voies de chargement
Voies de la gare
86m
Chemin d'arrivée
Wagonnets vides
Wagonnets pleins
Meiningen
Route

Fig. 165.

52. Rails suspendus. — Dans chaque station, des rails suspendus viennent faire suite aux câbles porteurs. Le raccordement est effectué au moyen d'un tronçon de 1 mètre à $1^m,50$ de longueur arrondi à sa partie supérieure et concave à sa partie inférieure par laquelle il repose sur le câble. Aussitôt après l'accouplement, les rails sont généralement cintrés latéralement avec un rayon d'environ 5 mètres pour l'arrivée des wagonnets pleins ayant une vitesse de $1^m,50$ à la seconde, et avec un rayon double pour une vitesse de $2^m,50$ à 3 mètres à la seconde. Du côté des wagonnets vides poussés à la main, on prend en moyenne un rayon de 5 mètres. Afin d'arrêter plus rapidement les wagonnets arrivant dans la station et pour diminuer le travail de l'ouvrier qui les pousse vers la sortie, on donne aux extrémités du rail une inclinaison qui varie de $\frac{1}{100}$ à $\frac{1}{50}$ selon la vitesse du câble tracteur. On dispose généralement la partie supérieure des rails à une hauteur de $1^m,90$ à 2 mètres au-dessus du plancher pour permettre de circuler librement au-dessous.

Au début, on utilisait comme rail un fer plat arrondi à sa partie supérieure ; ce profil est encore souvent employé pour de faibles charges unitaires et par les tronçons de raccordement aux câbles. La maison Th. Otto et C° se sert ordinairement dans ce cas du rail de 100 millimètres de hauteur et 35 de largeur représenté avec ses éclisses par la figure 166. Un tel rail pesant 26 kilogrammes par mètre a un module de résistance de 50 en cm^3. Comme on voit la résistance de ces rails est relativement faible, et on a été conduit aux profils à double tête des figures 167 et 168. Presque toutes les maisons s'occupant de chemins de fer aériens ont leurs profils et leurs rouleaux de laminoirs spéciaux. Les deux profils représentés sont de la maison Th. Otto et C° : le plus petit a une hauteur de 130 millimètres, et une largeur de tête de 30 millimètres ; son module de résistance est de 70 cm^3 et son poids propre de 17 kilogrammes par mètre courant ; le grand profil, de 200 millimètres de hauteur et 40 millimètres de largeur, pèse $27^{kg},50$

Fig. 166

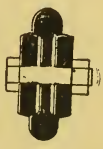


Fig. 167.

Fig. 168.

le mètre et a un module résistant de 145 cm³. Ce dernier module est presque le triple de celui d'un fer plat de même poids.

Les rails sont le plus souvent fixés par des supports ou chaises pendantes en fonte ; la figure 169 représente une construction américaine dans laquelle le rail formé par un fer plat est soutenu directement par un boulon. Les maisons spécialistes européennnes laissent reposer le rail sur une saillie appropriée du support, de façon à décharger le boulon. La figure 170 montre un support de la « Deutschen Maschinenfabrik A. G. » destiné à être fixé à la partie inférieure d'une poutre en bois ou d'un fer I ; les boulons qui s'appuient sur la plaque supérieure supportent toute la charge. Lorsque la station est construite en fer, on choisit de préférence pour fixer les supports un fer ⊔ à la partie supérieure duquel vient s'adapter un bourrelet du support représenté par la figure 171 d'après une construction de la même maison. Ces supports pèsent de 18 à 24 kilogrammes.

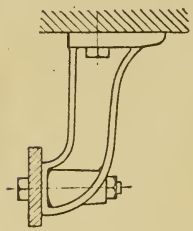


Fig. 169.

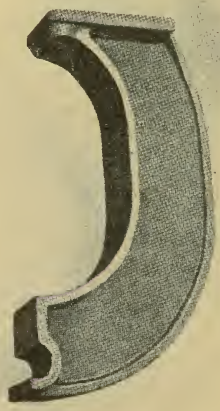


Fig. 170.

Fig. 171.

Les rails sont parfois soutenus à la partie supérieure de la construction par des supports très bas qui ne pèsent environ que 7 kilogrammes.

Dans certains cas particuliers, lorsque la construction est très haute. on fait ces derniers en fers profilés rivés.

Les rails sont boulonnés et peuvent être considérés comme des poutres reposant sur deux appuis. Si l'on admet comme fatigue maximum sous l'action du poids des wagonnets $k_f = 750$ kilogrammes par centimètre carré pour différents wagonnets se suivant sans interruption, les longueurs entre deux supports seront : dans le cas du profil de la figure 155 avec $\frac{I}{V}$ ou $W = 70$ cm³

pour $P = 550$ kg., $l = 3^m,10$
» $P = 750$ kg., $l = 2^m,60$
» $P = 1100$ kg., $l = 2^m,40$;

dans le cas du profil de la figure 156 avec $\frac{I}{V} = 145$ cm³

pour $P = 750$ kg., $l = 3^m,80$
» $P = 950$ kg., $l = 3^m,60$
» $P = 1100$ kg., $l = 3^m,40$.

Dans le cas de charges moyennes, le plus fort de ces profils permet d'exécuter les supports des voies suspendues d'une façon économique, sans utiliser beaucoup de matière.

Lorsque les charges sont assez lourdes, on intercale entre les chevalets deux ou trois supports fixés à la construction, généralement constituée par un fer ⊔. Cette disposition est coûteuse et il est parfois plus avantageux d'employer les rails renforcés représentés par la figure 172 avec des supports un peu différents de ceux généralement connus. Le grand profil avec cette disposition peut porter des wagonnets d'une contenance de 950 kilogrammes se suivant sans intervalles, et ceci sur une portée de 5 mètres. Les tirants peuvent être fixés au rail à l'atelier et expédiés ainsi entièrement montés sur les lieux de l'installation. Le mode de fixation aux supports donné par l'auteur a l'avantage de transmettre directement la tension horizontale aux chaises et d'éviter ainsi le flambage latéral du rail.

Comme le module de résistance du rail par rapport au plan vertica

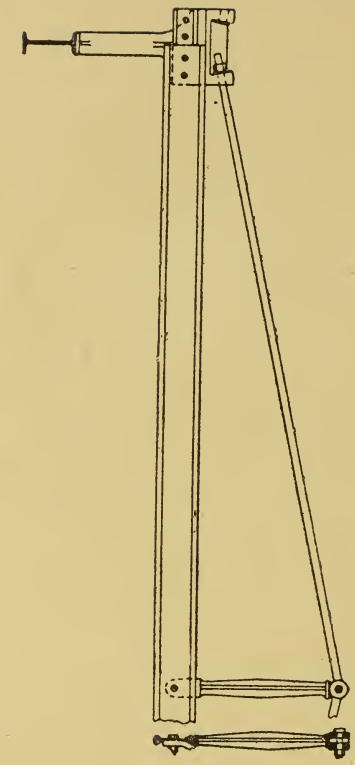
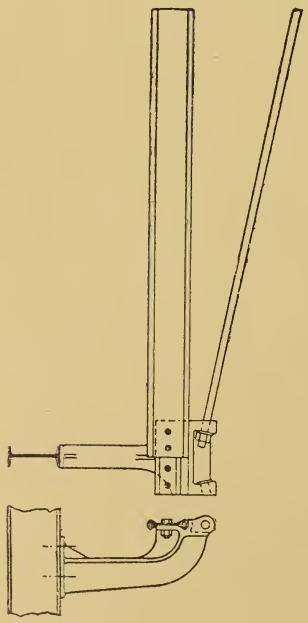


Fig 172.

moyen est faible, les flexions latérales se produisent très facilement lorsque la portée est grande, aussi doit-on ajouter un deuxième renfort dans ce sens.

Dans la pratique on remplace les tirants articulés par des triangles indéformables et des barres de tension en fer plat. On peut de cette façon construire en toute sécurité des travées allant jusqu'à 12 mètres et obtenir une économie considérable dans la suspension des rails. La faible rigidité latérale des rails ordinaires se fait parfois sentir d'une façon désagréable entre les supports, aussi Ad. Bleichert et C° emploient-ils depuis quelque temps un rail raidi dans le sens horizontal par une aile inférieure.

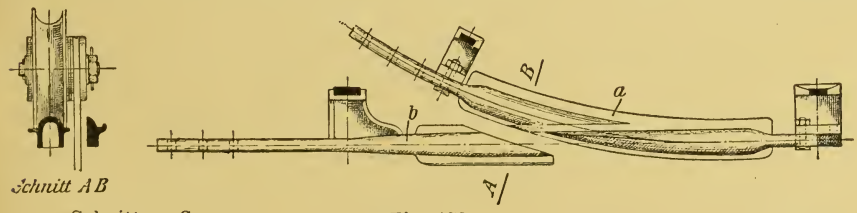


53. Aiguilles des voies suspendues. — Les aiguilles servant à relier deux lignes se sont perfectionnées dans les voies suspendues comme dans les chemins de fer. La plus simple et par suite la plus employée est celle formée par un tronçon articulé, droit ou cintré. du profil de la figure 166. A sa partie inférieure, cette aiguille présente une forme concave correspondant au profil de la tête de la voie principale sur laquelle elle repose ; on lui donne une pente douce afin d'être certain que les roues des wagonnets passeront bien sur la ligne

principale. L'axe d'articulation est placé de telle façon qu'au repos l'aiguille soit constamment appuyée sur la voie prolongeant le tronçon sur lequel est fixée l'aiguille. Lorsque les wagonnets doivent continuer leur parcours sur la ligne principale, on tire l'aiguille sur le côté au moyen d'une chaîne. Les inconvénients de cet aiguillage consistent dans la difficulté qu'ont les roues pour monter sur l'extrémité de la langue mobile et dans le faible moment d'inertie de l'aiguille.

On évite ces deux défauts en coupant également la voie principale. A l'endroit où les deux lignes se raccordent on place au-dessus des rails un palier en acier coulé ; les deux extrémités des voies sont formées par un tronçon mobile de même profil que les lignes et tournant autour d'articulations placées à environ $1^{m},20$ du croisement. Avec ce dispositif une extrémité repose toujours dans le palier central, tandis que l'autre est suspendue à une tige de fer spéciale. Ce deuxième aiguillage a l'avantage d'effectuer le raccordement sur une horizontale, mais il nécessite d'un autre côté une grande attention de la part de l'ouvrier : un wagonnet poussé sans que l'aiguille ait été préalablement fermée tombe forcément en arrivant à l'extrémité de la voie. Lorsque les wagonnets roulent sur l'aiguille en allant de la pointe vers l'articulation, la commande peut se faire au moyen d'une chaînette.

La maison Th. Otto et C° évite l'inconvénient de ce dernier dispositif en employant l'aiguillage Krempler (fig. 173). Ce dernier se compose



Schnitt = Coupe Fig. 173.

de deux parties fixes en acier coulé : la pièce centrale *a* et la pièce de raccordement *b*. *a* présente une rainure correspondant au boudin des galets de roulement et la pièce *b* est séparée de *a* par un espace suffisant pour le passage de la suspension des wagonnets. L'ouvrier conduit le wagonnet sur l'embranchement en poussant vers la droite ou vers la gauche sans avoir aucune manœuvre préalable à effectuer. Lorsqu'il pousse

latéralement la caisse du wagonnet, la suspension s'incline et évite la pièce de raccordement *b*. Cet aiguillage peut également être employé pour un croisement de voies : il se compose alors d'une pièce centrale *a* et de deux raccords *b* (fig. 174). La maison ci-dessus nommée ne cons-

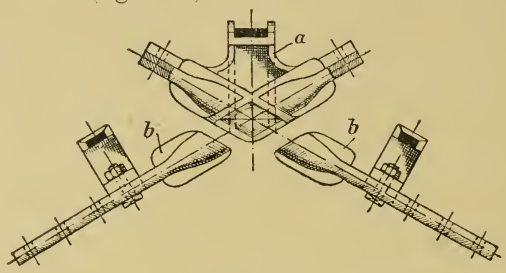


Fig. 174.

truit que deux modèles, pour 60° et pour 120°. Dans le cas d'un croisement à angle droit, cet aiguillage ne peut pas convenir, car l'espace libre destiné au passage de la suspension est trop grand et les roues ne peuvent traverser que sous l'action d'une grande poussée. On emploie

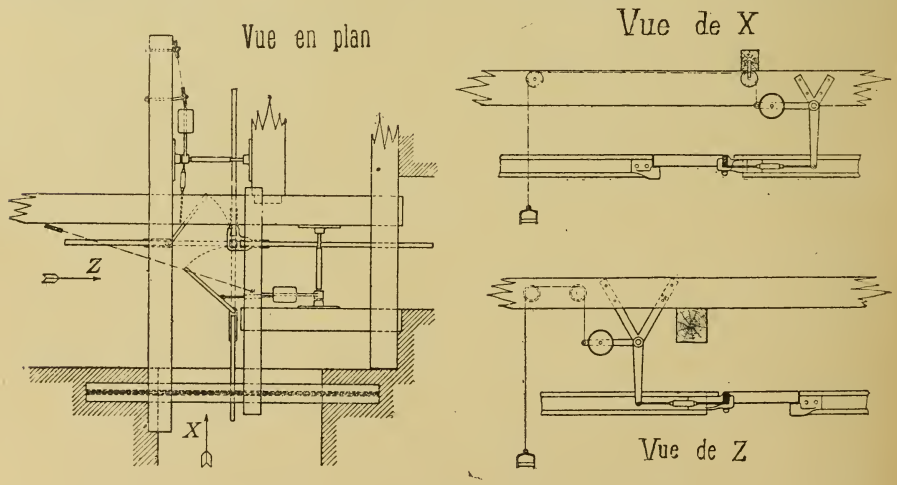


Fig. 175.

alors le dispositif représenté par la figure 175, qui se compose de deux courtes aiguilles venant reposer sur un palier placé à l'embranchement des deux voies. Les aiguilles sont en temps ordinaire constamment fermées sous l'action de contrepoids, et les wagonnets peuvent circuler sans

manœuvre préalable dans le sens de la flèche X ou en sens inverse de Z; pour les mouvements contraires, on doit d'abord ouvrir l'aiguillage en tirant sur une chaînette. Ces différentes constructions ne sont employées

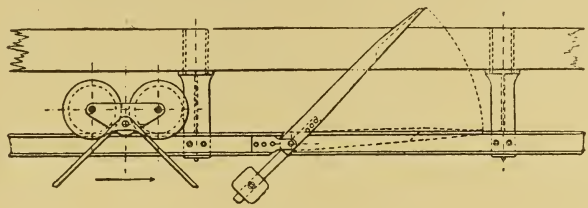


Fig. 176.

que pour des charges ne dépassant pas 600 kilogrammes, car l'extrémité de l'aiguille présente un grand porte-à-faux.

La maison Ad. Bleichert et Cie a résolu la difficulté provenant des aiguilles et des rails relevables, en articulant ceux-ci autour d'un axe

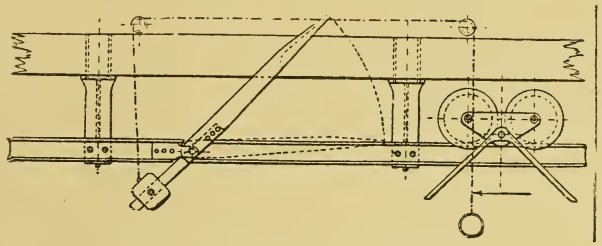


Fig. 177.

horizontal et en les maintenant constamment ouverts au moyen d'un contrepoids (fig. 176 et 178); la première représente un embranchement, la seconde un croisement. Les wagonnets arrivant dans le sens de la flèche rabattent l'aiguille dont l'extrémité vient reposer par sa partie in-

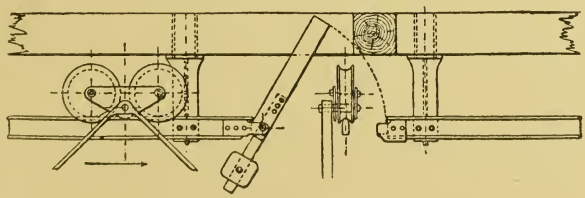


Fig. 178

férieure évidée sur le rail de l'embranchement; dans les croisements de rails, l'aiguille vient se poser dans le support maintenant l'extrémité du rail opposé. Lorsque la circulation se fait dans les deux sens, ce qui ne

se présente pas très souvent, l'aiguille peut être commandée à la main, à l'aide d'une chaînette (fig. 177).

Pour fermer l'aiguillage lentement et automatiquement avant le passage d'un wagonnet, on articule autour de l'axe O, une cornière S qui est relevée par les galets de roulement du chariot et abaissée à l'aide des leviers de l'aiguille K (fig. 179). Dans le cas où les wagonnets doivent

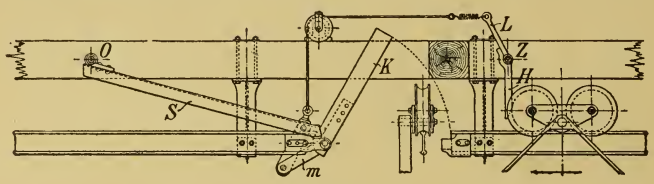


Fig. 179.

circuler dans les deux sens, on place un butoir H articulé autour de l'axe Z ; l'aiguille est alors manœuvrée automatiquement au moyen du levier L et d'un câble avec ressort.

Actuellement, on remplace souvent les aiguilles des croisements à 90° par des disques tournants ; la figure 180 montre une de ces constructions

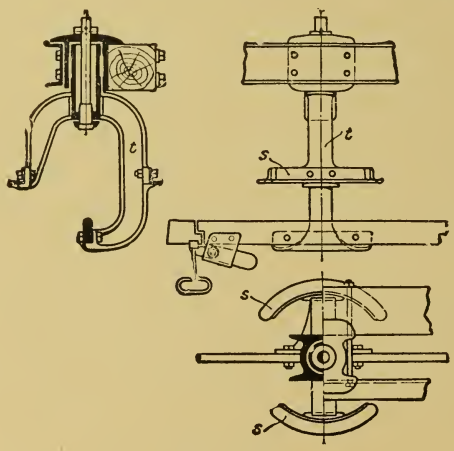


Fig. 180.

exécutée par la maison J. Pohlig. Un support articulé *t* porte à sa partie inférieure un tronçon de rail et latéralement deux cornières cintrées *s* qui condamnent la circulation des wagonnets sur la voie interrompue. Un cliquet articulé sur le rail inférieur empêche le support de tourner lorsqu'il porte un wagonnet.

54. Voies aériennes pour le transport de déchets. — En munissant les caisses de wagonnet d'un levier coudé approprié, elles se vident automatiquement pendant le parcours lorsque le levier vient buter contre un appareil culbuteur (voir chapitre 42). Sur la ligne, cet appareil est fixé au câble porteur, de telle sorte qu'après desserrage d'un boulon il puisse être facilement poussé par une caisse de wagonnet. Ces dispositifs de culbutage sont souvent formés par un grand étrier portant à sa partie inférieure un rouleau-guide pour le câble tracteur et un contrepoids

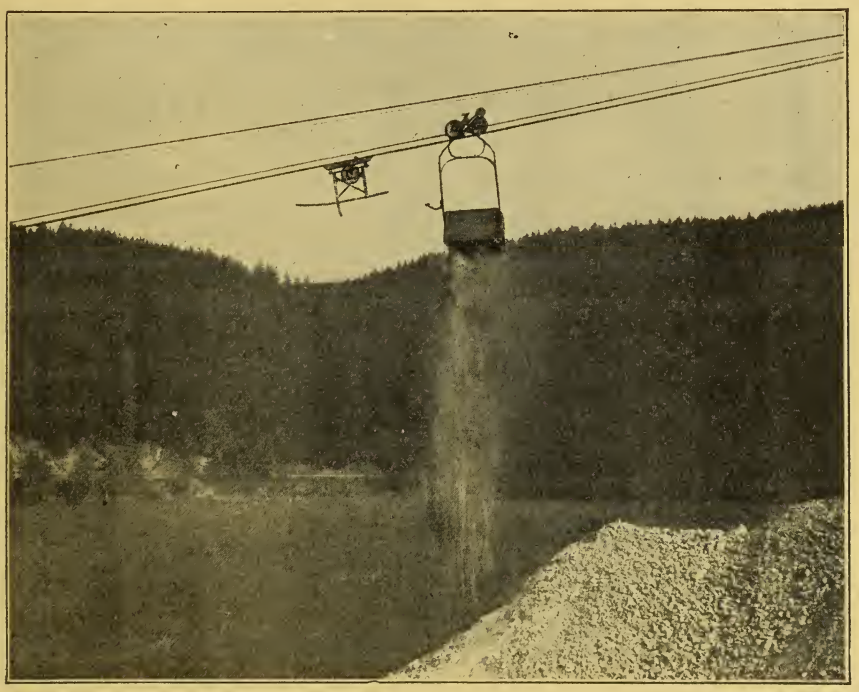


Fig. 181.

pour le maintenir vertical. Lorsque l'appareil d'accouplement se trouve à la partie supérieure du chariot, on place le rouleau-guide assez haut et le culbuteur prend alors la forme représentée par la figure 181, d'après Th. Otto et C°.

On a également essayé de déplacer le déclancheur à l'aide d'un câble spécial et d'un petit treuil placé sur le pylône le plus proche, de

façon à ne pas avoir besoin d'arrêter l'installation. Le câble tracteur s'enchevêtre très facilement avec ce câble du culbuteur, aussi se sert-on de préférence du premier dispositif décrit. Dans le cas d'un transporteur sur voie suspendue, on peut cependant employer avantageusement le deuxième dispositif en plaçant le câble de commande suffisamment loin du câble tracteur ; la figure 182 représente une construction de ce genre de la maison Ad. Bleichert et Cie (1).

Il est encore à remarquer que, lorsque le vidage s'opère brusquement, la flèche du câble porteur diminue sous l'action du tendeur auto-

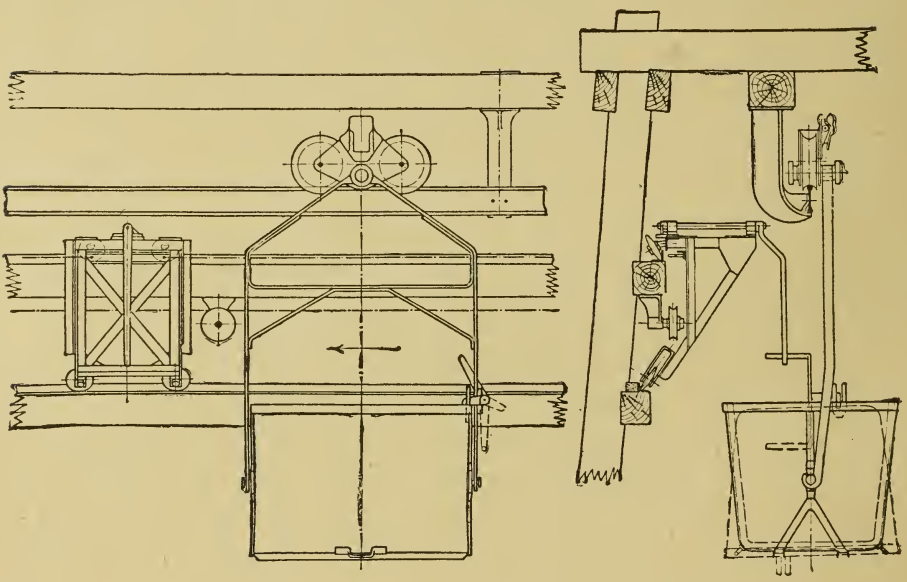


Fig. 182.

matique et le wagonnet se trouve ainsi soulevé. On prétend parfois que sous l'action de ce mouvement brutal, les accouplements fonctionnant sous l'action du poids du wagonnet peuvent s'ouvrir. Cette supposition n'est pas admissible, car le câble porteur soulève le wagonnet tout entier et les mouvements du chariot, de la suspension et de la caisse sont les mêmes et se font simultanément avec la même accélération.

Les dispositifs qui viennent d'être décrits sont employés pour la for-

(1) *Z. d. V. d. Ing.*. 1903, page 1631.

mation de terrils et la mise en tas de déchets. Lorsqu'on dispose d'un terrain suffisamment grand à remblayer, les voies aériennes ordinaires avec appareils de culbutage sont les plus simples et les meilleur marché pour la mise en terril. Si l'on veut entasser une assez grande quantité de déchets dans un terrain plat et limité, on est amené à construire une très haute station terminale, qui atteint parfois jusqu'à 40 et 45 mètres.

Lorsqu'avec ce système on a atteint la hauteur des câbles sur toute la longueur libre, on raccorde à la ligne des voies suspendues pour étendre le terril latéralement. Pour éviter cette dernière opération qui est toujours difficultueuse et coûteuse Ad. Bleichert et Cie emploient un transporteur aérien automatique représenté par la figure 183. Cet

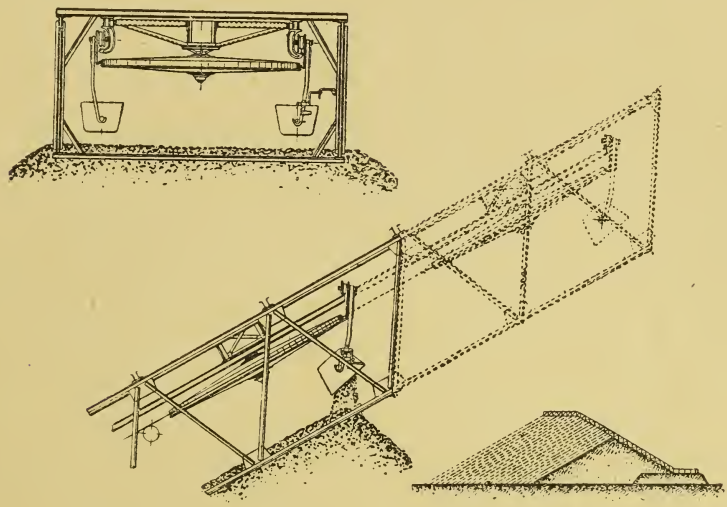


Fig. 183.

appareil consiste en un pont construit avec une pente correspondant le mieux possible à celle du talus naturel du terril. Ce pont est formé de deux poutres latérales en treillis dont les contreventements inférieurs et supérieurs sont reliés entre eux, de façon que l'intérieur reste libre. Il est pourvu d'une voie à câble dont la station de chargement est installée au pied du talus ou à n'importe qu'elle distance de celui-ci. Le pont même est établi en pièces séparées assez courtes, de sorte qu'il peut toujours être allongé au fur et à mesure de l'avancement du déversement des ter-

rils. On effectue cet allongement quand la masse de terrils déversée atteint la partie inférieure de la dernière travée, de manière que celle-ci ait un soutien suffisant : on en ajoute une nouvelle en porte-à-faux et dépassant le sommet temporaire du terril, puis on avance la poulie de

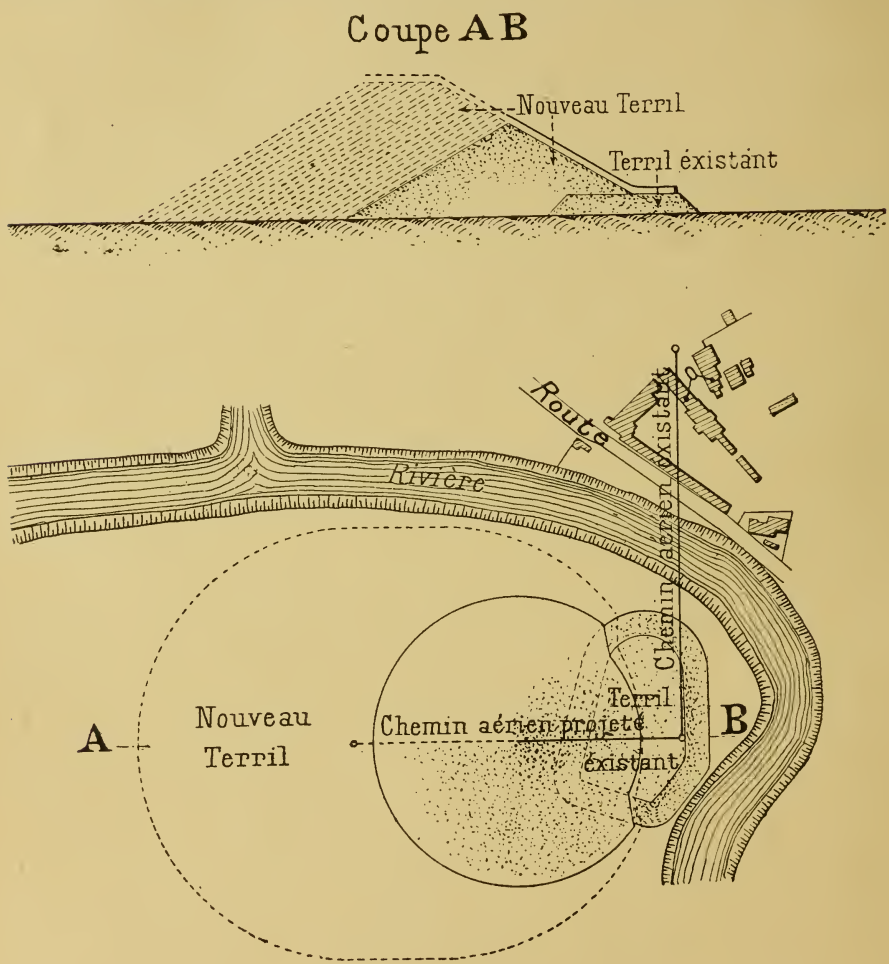


Fig. 184.

retour de l'ancienne travée dans la nouvelle, et le déversement recommence.

Les principaux assemblages sont avantageusement établis au moyen

de boulons, de façon à ce qu'un démontage éventuel puisse avoir lieu facilement et à bon marché.

Pour faciliter l'addition d'une nouvelle travée et pour accélérer le montage, la poulie de retour repose, avec son tronçon de rail suspendu, dans un cadre muni de roues. Etant donné que ces roues se déplacent dans des guides fixées à la charpente, le cadre peut, après l'addition d'une nouvelle travée, être avancé jusqu'au point terminal du pont. L'appareil tendeur reçoit naturellement une levée plus grande, de manière à rendre possible l'addition d'une nouvelle partie de pont, sans qu'on soit obligé d'épisser chaque fois un nouveau morceau de câble tracteur.

Les wagonnets circulant sur les rails suspendus du pont qui, au moyen d'un chemin aérien, peuvent être mis en communication directe avec le pont de déversement du lavage de charbon ou de la granulation de laitiers, tournent autour de la poulie de renvoi sans se découpler du câble tracteur. Un appareil de basculement automatique provoque le vidage des wagonnets qui retournent à la station de chargement avec leur caisse renversée.

Hauteur du terril en mètres	Diamètre de la base en mètres	Volume en mètres cubes	Temps nécessaire à l'amoncellement	
			Jours = Années	+ Mois
30	86	58 100	290 = 1	—
35	100	91 630	460 = 1	+ 5 1/2
40	115	138 500	700 = 2	+ 3 1/2
45	129	197 000	1 000 = 3	+ 3 1/2
50	143	267 700	1 350 = 4	+ 5
55	158	359 500	1 800 = 6	—
60	172	464 700	2 350 = 7	+ 9 1/2
65	186	588 730	2 950 = 10	—
70	200	733 100	3 700 = 12	+ 3 1/2
75	215	907 630	4 550 = 15	+ 2
100	286	2 150 000	10 800 = 36	—
125	358	4 200 000	21 000 = 70	—

La figure 184 représente une voie aérienne pour terrils système Bleichert à laquelle vient se raccorder un ancien chemin aérien. Elle a été construite sur un remblai de 35 mètres; elle atteint actuellement

80 mètres et est prévue pour 125 mètres. Le tableau de la page précédente montre que les allongements se font à des intervalles de plus en plus grands et qu'on peut amonceler des quantités énormes de déchets. On a admis un débit journalier de 200 mètres cubes et un angle du talus naturel d'éboulement de 35°.

55. Voies suspendues des stations terminales. — Les figures 185 représentent une station terminale d'un chemin aérien construit par Th. Otto et C° avec une installation de voies suspendues pour le transport

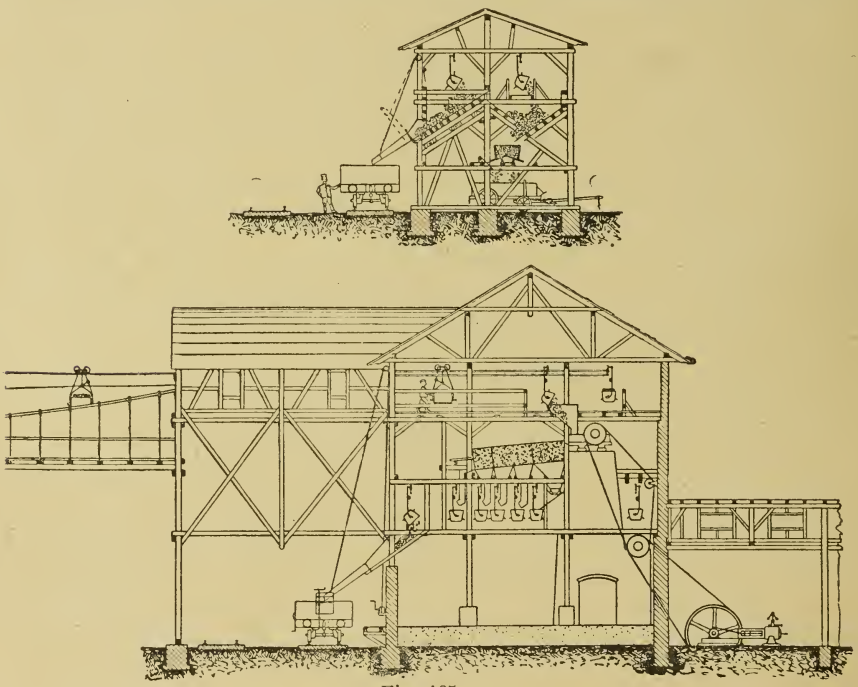


Fig. 185 *a*.

de basaltes. La matière arrive à l'étage supérieur du bâtiment d'où elle est directement déversée dans trois concasseurs.

Afin d'éviter un trop grand trajet aux wagonnets, après chaque appareil on a prévu un embranchement avec aiguillages qui relie les voies d'arrivée et de retour. Derrière le dernier concasseur se trouve un monte-charges double pour amener des matières à concasser du premier étage au second ou du gravier du rez-de-chaussée à la voie

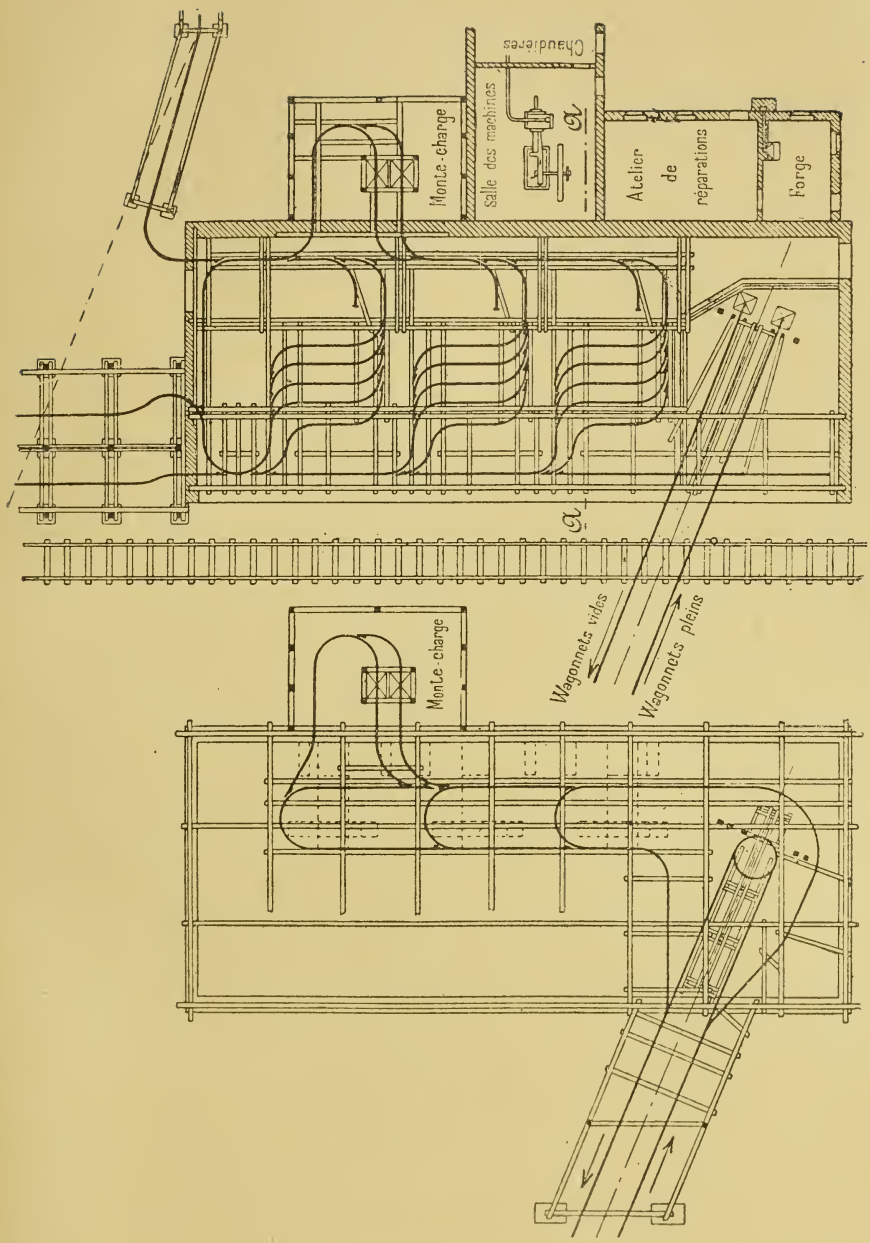

Chaudières
Salle des machines
Monte-charge
Atelier de réparations
Forge
a
a
Wagonnets vides
Wagonnets pleins
Monte-charge

Fig. 185 b.

de chargement du premier étage. A cet étage il existe au-dessous de chaque cylindre trieur une série de voies suspendues permettant de charger directement les différentes grosseurs de basalte dans les wagonnets correspondants. Ceux-ci une fois remplis sont poussés sur le rail de déchargement située du côté de la voie ferrée, et culbutés au-dessus de couloirs qui conduisent le basalte dans les wagons de chemin de fer. Au bâtiment des concasseurs vient se raccorder un silo d'emmagasinage d'environ 30 mètres de long destiné au chargement des wagons et des camions ; la petite vue de la figure 185 *a* montre une coupe de ses trémies. Une voie aérienne sert enfin à enlever les déchets inutilisables et à les mettre en tas.

Le rayon des courbes est de $1^{m},50$ à 2 mètres. On a généralement employé les aiguilles brevetées Otto.

56. Voies suspendues pour dépôts. — J. Pohlig a construit une installation très importante de ce genre destinée au transport de minerais pour la « Niederrheinische Hütte ». Les minerais arrivant par bateaux sont directement chargés dans les wagonnets aériens. Ceux-ci sont amenés sur les voies suspendues au moyen de deux grues tournantes à commande électrique (fig. 186) ,placées sur de solides piles en maçonnerie surmontées de deux constructions métalliques réunies par un pont avec rails suspendus. Les wagonnets sont alors entraînés sur une voie d'environ 140 mètres de longueur dont la charpente est en fer. Sur cette ligne principale se trouvent quatre rails d'accrochage et de décrochage d'où partent des embranchements parallèles à la rive sur lesquels les wagonnets sont poussés et culbutés à la main. Chacune de ces voies secondaires sert à la manutention d'une sorte de minerai.

Cette installation qui donne entièrement satisfaction présente l'inconvénient de nécessiter trop de personnel pour son fonctionnement, les wagonnets étant poussés à la main sur la plus grande partie du parcours.

Avec les appareils d'accouplement à pince à la partie supérieure du chariot qui permettent de dévier le câble tracteur dans tous les sens, on a essayé de desservir d'une façon complètement automatique des dépôts de ce genre.

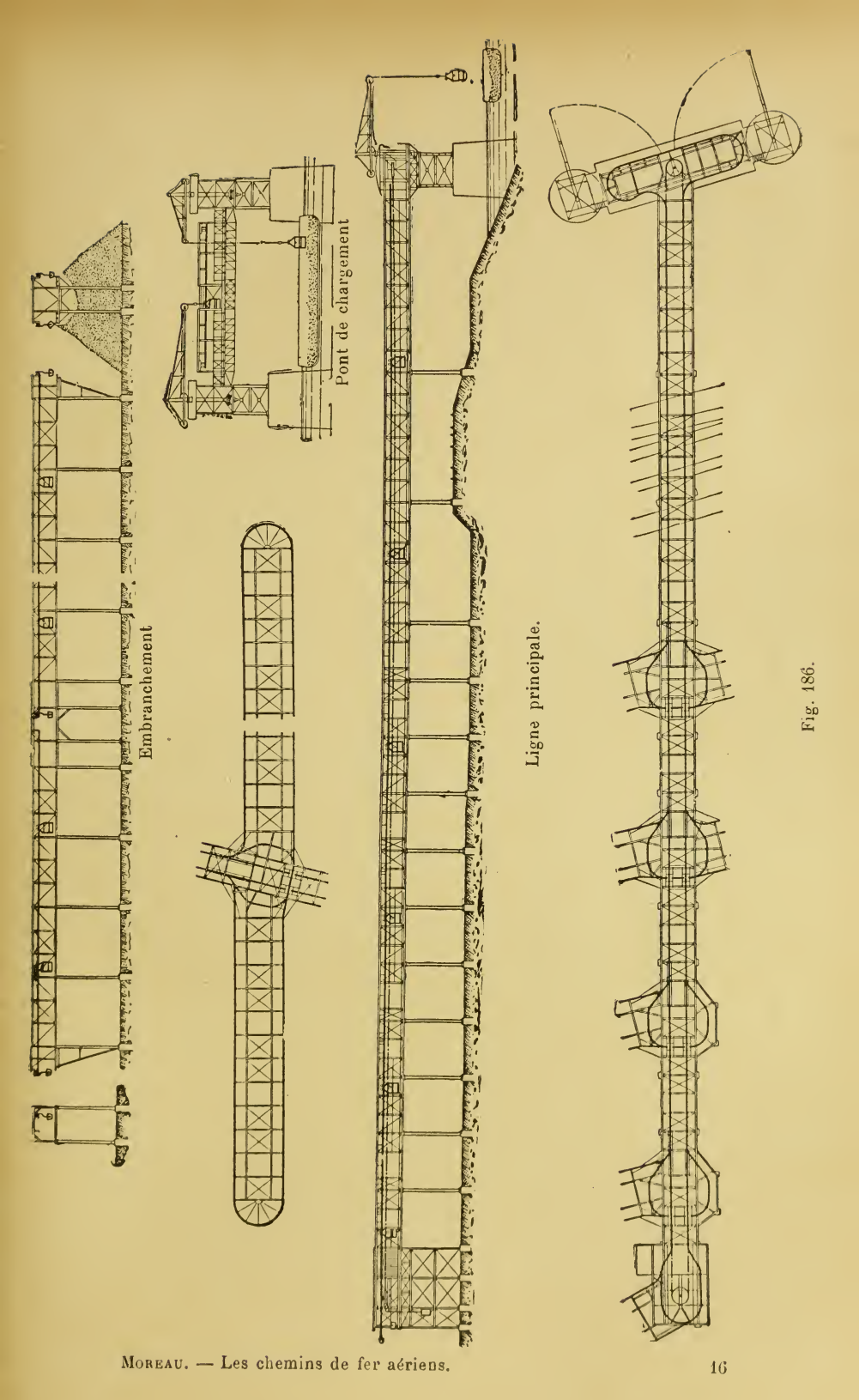


Fig. 186.

La maison Ad. Bleichert et C° a construit pour une aciérie un transporteur formé par deux voies suspendues à traction par câble placées l'une près de l'autre et distinctes [1]. Comme la rive était très plate, on a établi à une certaine distance en mer un pont de chargement monté sur piles en béton (fig. 187). La plateforme a 105 mètres de long et 16 mètres de large ; elle reçoit d'un côté les steamers qui amènent le charbon et de l'autre les barques à voile chargées de minerai et de castine. Le charbon est déchargé au moyen de quatre grosses grues pivotantes et amené ainsi dans des trémies de transbordement. Le chemin de roulement du chariot de ces grues est incliné ; elles sont orientées une fois pour toutes au-dessus des écoutilles et restent dans cette position jusqu'à ce que le bateau soit complètement déchargé. Leur débit est de 30 tonnes à l'heure avec une benne de 1 250 kilogrammes. Le déchargement des barques est effectué par quatre grues tournantes et également par l'intermédiaire de trémies transbordeuses. Les treuils de toutes les grues sont renfermés dans deux cabines contenant chacune un moteur électrique qui commande les arbres intermédiaires des tambours au moyen de courroies.

A l'extrémité du débarcadère la plus rapprochée de la rive vient se raccorder le pont métallique supportant les rails de la ligne aérienne. La commande et le tendeur des deux voies se trouvent également sur la plateforme de chargement. Les wagonnets sont entraînés d'une façon absolument automatique au-dessus des dépôts de charbon, de minerai et de castine en contournant des poulies à câble de 4 mètres de diamètre et le culbutage s'effectue au moyen des appareils de déclanchement déplaçables déjà décrits. Le tas de charbon a une longueur de 125 mètres, une largeur de 40 mètres et peut atteindre jusqu'à 7 mètres de hauteur ; le dépôt de minerai qui est formé d'une façon analogue a une largeur de 32 mètres. Chaque transporteur aérien a un débit de 100 tonnes à l'heure, avec des wagonnets se suivant à 27 secondes d'intervalle, soit à des distances de 20 mètres.

Lorsqu'on a un grand terrain à sa disposition et qu'on n'est pas obligé de former un tas rectangulaire, l'installation se simplifie beaucoup ; la

---

[1] Z. d. V. d. Ing. 1903, p. 1630.

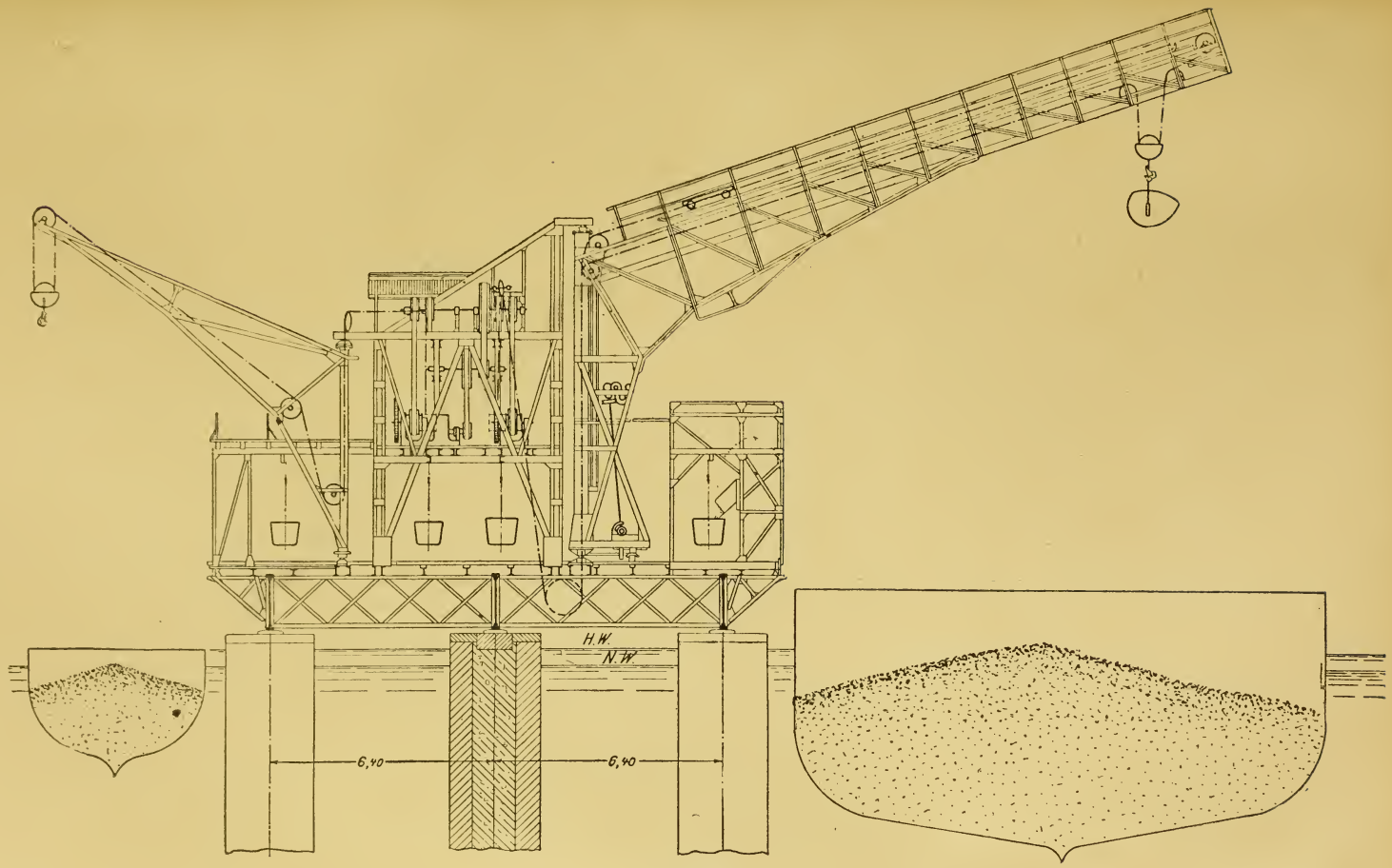


Fig. 187.

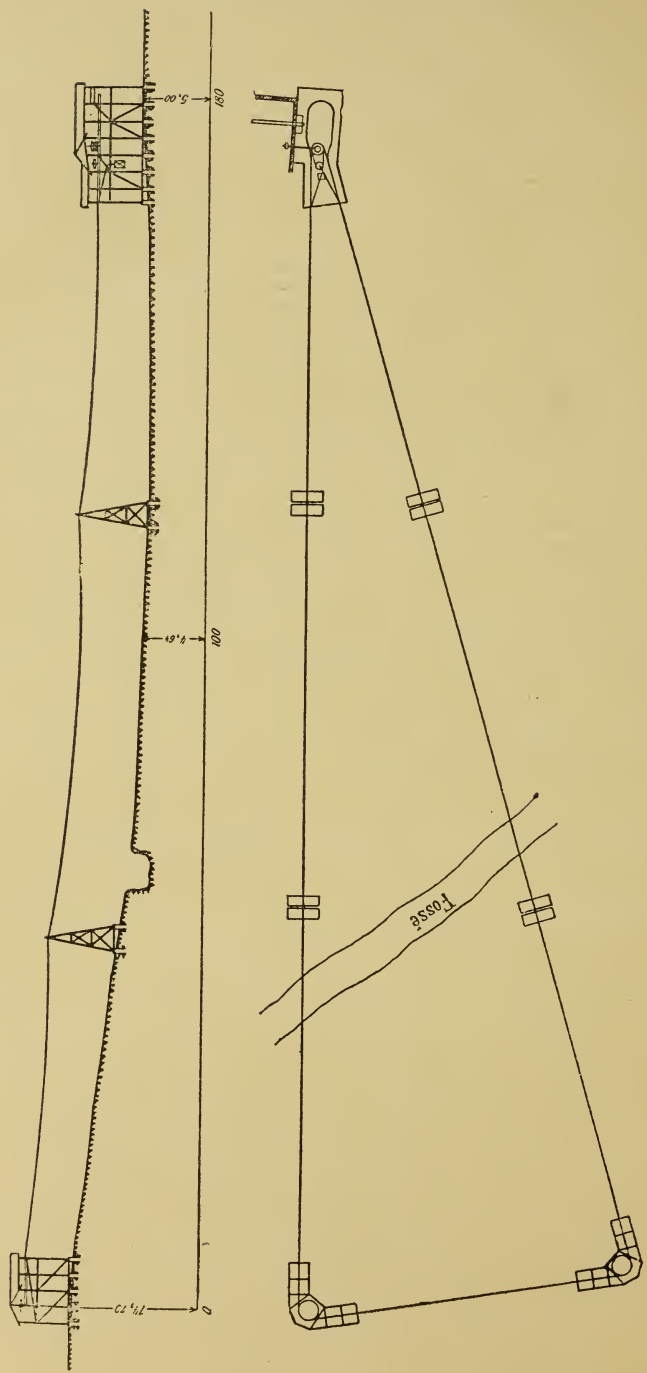


Fig. 188.

figure 188 nous montre un exemple de ce genre établi par Ceretti et Tanfani dans une sucrerie. Il s'agit dans ce cas de former trois tas de cossettes de betteraves d'environ 50 mètres de longueur de chaque côté d'un fossé. Les wagonnets parcourent un triangle isocèle de 180 mètres de côté et contournent dans chaque angle une poulie-guide de 3 mètres de diamètre. Les deux câbles porteurs principaux sont ancrés dans les stations d'angle et maintenus à une tension constante par des contrepoids de la station de départ. Les wagonnets sont culbutés automatiquement au moyen d'un appareil de déclanchement placé sur chaque voie et manœuvré du sol. Ce chemin aérien, qui doit transporter et mettre en dépôt 500 tonnes de cossettes de betterave par 24 heures, nécessite une force de 5 HP. La contenance des wagonnets est de 300 kilogrammes, et ils se suivent à des intervalles de 51 mètres avec une vitesse de 1 mètre à la seconde.

57. Dépôts avec ponts spéciaux. — Les différentes installations de voies suspendues qui viennent d'être décrites montrent clairement que la disposition adoptée n'utilise pas entièrement le terrain car elle ne permet de former que deux tas parallèles. De plus la matière doit être reprise à la main pour être transportée ensuite au moyen de wagonnets à voie étroite ou autres véhicules roulant sur le sol. La mise en dépôt uniforme sur une étendue de terrain déterminée, la reprise et l'enlèvement de la matière, ne peuvent être faits mécaniquement qu'au moyen de voies suspendues mobiles. La planche II représente un exemple bien compris de ce genre de construction, exécuté par la Deutschen Maschinenfabrik A. G. pour les mines Antonienhütte des princes Hugo, Lazy, Arthur de Henkel-Donnersmarck et destiné à un transport horaire de 100 tonnes.

Les charbons sortent en huit catégories du triage pour être transportés au dépôt voisin. Les wagonnets d'une contenance de 650 kilogrammes sont poussés vers la sortie de la station, passent sur une bascule automatique et de là sur des voies suspendues distantes l'une de l'autre de $2^m,25$. Les rails sont fixés en dessous d'un pont déjà existant qui conduit au premier étage du triage ; à l'extrémité du pont se trouvent deux poulies-guide de $3^m,75$ de diamètre représentées avec leurs supports fig. 189.

Les wagonnets sont alors entraînés sur les rails que l'on voit à gauche; ces voies supportées par des pylônes métalliques sont à une distance de $3^m,90$ l'une de l'autre et existent tout le long du dépôt. A l'extrémité de cette ligne de 185 mètres de longueur, les wagonnets contournent une poulie de renvoi de $3^m,75$ de diamètre (fig. 190). Cette figure

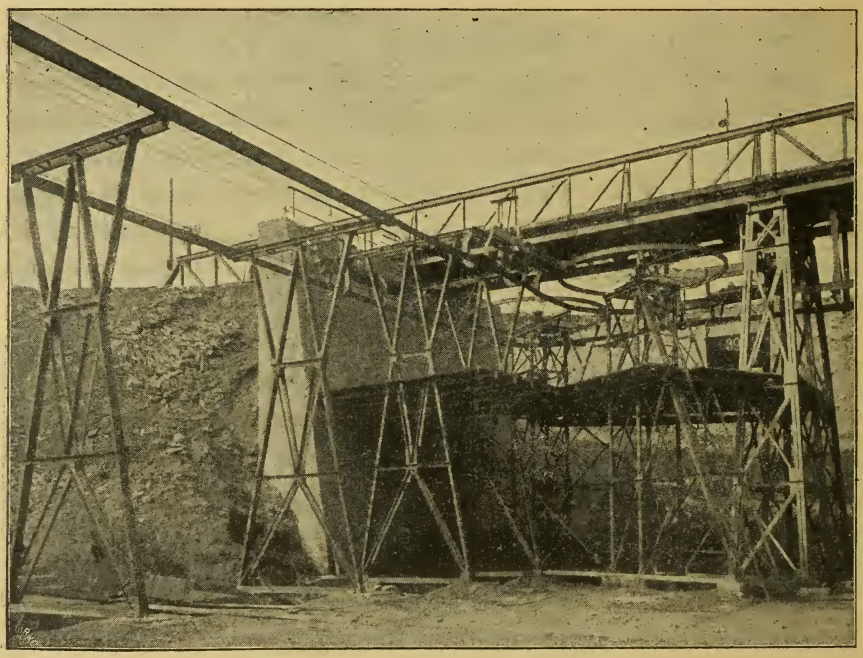


Fig. 189.

montre également les rouleaux oscillants qui guident le câble tracteur devant la poulie de renvoi.

Un pont roulant de 120 mètres de long se déplaçant dans le sens de cette ligne vient se raccorder à la voie longitudinale au moyen de deux aiguilles qui glissent sur le rail intérieur. Le câble tracteur passe de la ligne sur le pont en décrivant une courbe de 2 mètres de rayon au moyen de poulies-guide de 1 mètre. Sur la première voie du pont, on a placé huit leviers de déclanchement de longueurs différentes, correspondant aux huit sortes de charbon. Le levier de culbutage de la caisse est déplaçable et réglé selon la qualité de charbon par l'ouvrier

qui pousse le wagonnet vers l'accrochage. Le déchargement s'effectue ainsi automatiquement à l'endroit voulu du dépôt.

Sur la voie de retour du pont, la course des wagonnets peut être interrompue au milieu où se trouve un plancher pour les ouvriers. Dans le cas où l'on veut transporter du charbon du dépôt au triage, on peut recharger les wagonnets en cet endroit au moyen d'une petite trémie de transbordement. Les rails d'accouplement sont mobiles, de sorte que les

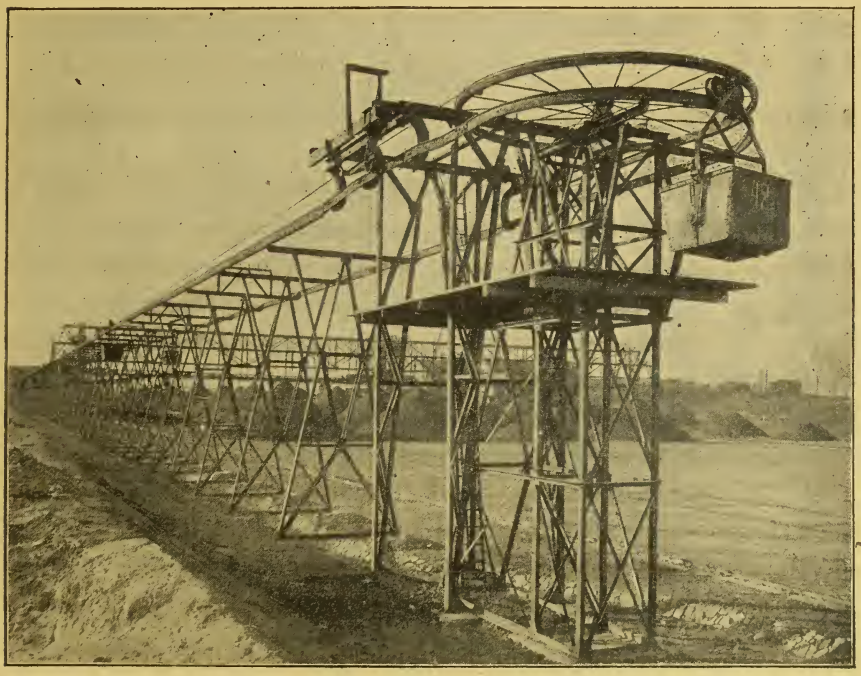


Fig. 190.

wagonnets vides peuvent retourner à la station de départ sans quitter le câble tracteur.

A la partie supérieure du pont se déplace sur toute sa longueur un chariot avec benne preneuse qui transporte le charbon du dépôt soit dans les wagons de chemin de fer, soit dans la trémie transbordeuse. La commande de cette installation est mise en mouvement par un moteur à courant alternatif qui en plein fonctionnement fournit une force de 20 HP.

Les détails du pont sont donnés par la planche II. Il est formé par deux poutres en treillis parallèles et repose sur trois jambages dont les deux extrêmes sont articulés pour permettre les variations de longueur causées par les changements de température. La charge totale est supportée par 16 galets de roulement en acier coulé : 4 à chaque extrémité et 8 au milieu, roulant sur deux rails écartés de 2 mètres. La translation du pont est commandée par trois moteurs à courant alternatif d'une force maximum de 16 H.P. faisant 1 220 tours à la minute. Les galets qui ont un diamètre de $0^m,80$ et une vitesse de $30^m,60$ à la minute, sont mis en mouvement par l'intermédiaire d'une roue et vis sans fin réduisant la vitesse de $\frac{1}{10}$, et de deux paires d'engrenages cylindriques ayant un rapport de $\frac{1}{3\,{}^1/_3}$ et $\frac{1}{3}$. La marche simultanée des moteurs est obtenue en commandant les trois démarreurs par un même levier. La disposition est cependant telle qu'on peut commander aussi séparément chaque moteur, pour ramener par exemple dans sa position normale une des jambes qui serait restée en arrière par suite d'un glissement des galets. La commande des moteurs de translation se fait de la cabine placée au-dessus du jambage articulé près de la voie suspendue.

Le chariot de la benne preneuse est formé par des fers profilés rivés entre eux, sur lesquels reposent les organes de levage et de translation ; à ce chassis vient également se fixer la cabine entièrement fermée du conducteur qui contient les appareils de manœuvre. La translation est commandée par un moteur analogue à ceux du pont par l'intermédiaire d'une roue et vis sans fin de rapport $\frac{1}{12}$ et d'un train d'engrenages cylindriques ; les roues ont $0^m,60$ de diamètre et une vitesse de 3 mètres à la seconde. Le moteur du levage est de 50 H.P, et fait 605 tours à la minute ; il communique au tambour de $0^m,80$ de diamètre une vitesse de 35 mètres au moyen d'une roue et vis sans fin réduisant de $\frac{1}{8}$ et d'un train d'engrenages cylindriques de rapport $\frac{1}{5,04}$.

La benne preneuse de 3 mètres cubes de contenance, est à deux chaînes et peut être ouverte à n'importe quelle hauteur. La nature du charbon

est de ce fait très peu modifiée par la manutention, car le conducteur peut ouvrir la benne aussi doucement qu'il le désire.

La maison Ad. Bleichert et Cie a construit une installation analogue à l'usine à gaz de la ville de Berlin à Tegel. Le chemin aérien fait tout le tour du dépôt rectangulaire et le pont de déchargement et de chargement roule sur des rails portés par la construction des voies suspendues. Une grue avec benne preneuse se déplace sur le pont. La charpente des voies suspendues, qui doit supporter en même temps le pont roulant et la grue, est naturellement beaucoup plus lourde que dans le cas précédent. La plupart des manutentions de l'usine à gaz de Tegel étant effectuées par des transporteurs aériens, on peut considérer cette installation comme une des plus modernes.

58. Transporteurs aériens pour le chargement des hauts-fourneaux (1). — Dès qu'il a fallu amener aux hauts-fourneaux le coke et le minerai d'un endroit très éloigné on a naturellement été conduit à prolonger le chemin aérien jusqu'aux gueulards des fours. La maison J. Pohlig a construit une installation de ce genre destinée au transport de charbon pour la Hörder Bergwerks-und Hüttenverein (2).

On a fait depuis plusieurs installations pour le transport direct des charges des halls d'emmagasinage aux gueulards des hauts-fourneaux. Ce mode de chargement a l'avantage, sur les plans inclinés avec chariot fixe, actuellement très employés, de ne nécessiter aucun transbordement et d'amener directement toutes les matières dans une même trémie placée au-dessus des gueulards. De plus le chargement au dépôt avec des goulottes nécessite beaucoup moins de personnel. Au pied de la voie suspendue inclinée, on dispose plusieurs voies de garage pour la préparation des charges et, lorsque celles-ci sont prêtes, on envoie les wagonnets à de très courts intervalles les uns des autres.

La première de ces installations a été construite par la maison Ad. Bleichert et Cie pour la Maximilianshütte à Unterwellenborn. Les dépôts

---

(1) Rudolf Brennecke, *Gichtseilbahnen*, *Stahl und Eisen*, 1904.
(2) G. Rasch, *Z. d. V. d. Ing.* 1902, page 1532.

sont situés à 6 mètres au-dessous de la base des hauts-fourneaux et séparés de ces derniers par le hall de coulée avec ses voies ferrées. Les minerais, la castine et le coke sont amenés par des voies normales et des voies étroites placées au-dessus des dépôts. La reprise s'opère par la partie inférieure à l'aide d'un grand nombre de voies suspendues qui se réunissent au moyen d'aiguillages vers l'accrochage de la voie à câble. Le transporteur incliné est formé de deux ponts qui font avec l'horizontale un angle de 30° et viennent se terminer à la plateforme des gueulards. Des voies suspendues partent de l'accrochage supérieur et se terminent en cercle au-dessus des trémies de chaque haut-fourneau.

La longueur du transporteur à câble est de 95 mètres entre les poulies terminales et la montée totale est de $30^{m},60$. Le débit horaire est fourni par 150 wagonnets de $4^{hl},5$ qui se suivent à des distances de 24 mètres, avec une vitesse normale de 1 mètre à la seconde. Au moment du transport du minerai, la force nécessaire est d'environ 20 H.P.

La maison Ad. Bleichert et Cie a déjà construit un certain nombre d'installations de ce genre ; une a été édifiée assez récemment aux aciéries Gebr. Stumm à Neunkirchen. Les chariots des wagonnets sont munis d'un moteur électrique et roulent automatiquement sur les voies horizontales ; on supprime de ce fait les appareils d'accouplement déplaçables et toute leur construction.

59. Frais d'établissement et amortissement. — Les frais de premier établissement des chemins de fer aériens dépendent surtout des services qu'on en exige et de la construction des stations terminales et intermédiaires ; on ne peut donc indiquer que des sommes approximatives et ne s'appliquant qu'à des installations ordinaires faites dans de simples conditions. Le petit tableau ci-après a été établi par la maison Ceretti et Tanfani : il comprend dans les prix, pour un terra inpresque horizontal : les câbles, la commande, les tendeurs, la partie mécanique des pylônes et les wagonnets.

Débit horaire	Prix
10 tonnes	8,8 *l.* + 3 000 francs
20 »	12,0 *l.* + 4 000 »
40 »	15,2 *l.* + 5 000 »
60 »	18,4 *l.* + 6 000 »
80 »	21,6 *l.* + 7 000 »

l étant la longueur du transporteur en mètres.

A ceci il faut encore ajouter la charpente des pylônes sur toute la ligne, les ponts-abri et filets protecteurs ainsi que toute la construction des stations et des voies suspendues qui s'y raccordent. Ces derniers frais d'installation doublent souvent ceux indiqués au tableau.

Dans son ouvrage sur les moyens de transport, von Hanffstengel donne un tableau très intéressant relatif aux frais de manutention, avec différents systèmes de transporteurs pour un même débit et une longueur donnée. On y remarque qu'un chemin aérien à faible débit est plus économique, malgré ses frais d'établissement, que le transport sur voie étroite par wagonnets à traction animale. Dans le cas d'un grand débit, un transporteur aérien est bien meilleur marché qu'une voie ferrée ordinaire.

Nous allons examiner les chiffres exacts se rapportant au transporteur de cossettes de betteraves (fig. 188). Les frais d'établissement avec tous les accessoires s'élevaient à K = 25 000 francs. En admettant l'intérêt de ce capital Z = 5 % et l'amortissement en 10 ans, on devra retrancher chaque année une somme S donnée par l'égalité :

$$S = K \frac{z(1+z)^n}{(1+z)^n - 1}$$

d'où

$$S = 3\,235 \text{ francs.}$$

Si la sucrerie fonctionne pendant 100 jours par an, on aura comme frais d'amortissement 32fr,35 par jour.

L'installation nécessite 5 H. P. et si l'on admet une dépense de

$0^{kg},700$ de charbon par cheval-heure, le prix d'une tonne de charbon étant de $37^{fr},50$ (en Espagne) le coût journalier sera :

$$\frac{0,7 \times 24 \times 5 \times 37,5}{1000} = 3^{fr},25.$$

Deux hommes suffisent pour le service du transporteur ; comme il fonctionne nuit et jour, on aura donc 4 salaires à 3 francs c'est-à-dire 12 francs par jour.

Le parcours étant relativement court, nous compterons pour le graissage $0^{fr},05$ seulement par wagonnet pendant toute la période ; le mouvement journalier étant de 1 660 charges, la dépense sera de $0^{fr},83$ par jour.

Vu le fonctionnement continu pendant 100 jours, nous prendrons 12 % des frais d'installation pour les réparations, soit 3 francs par jour.

La dépense quotidienne pour un débit de 500 tonnes sera donc de :

$$32,35 + 3,25 + 12 + 0,83 + 3 = 51^{fr},43$$

ou $0^{fr},103$ par tonne.

Avant la construction du chemin aérien, le transport se faisait par voie étroite et on employait 35 ouvriers par jour, de sorte que la dépense par tonne était de $0^{fr},375$.

Avec un transporteur d'une certaine longueur débitant 40 tonnes à l'heure, on peut compter sur $0^{fr},025$ par tonne kilométrique pour l'amortissement et l'entretien ; lorsque le débit est plus grand, la dépense descend jusqu'à $0^{fr},015$. Comme frais de graissage et de nettoyage, on admet généralement $0^{fr},005$ par tonne kilométrique.

Dans certaines conditions spéciales, le transport par chemin de fer aérien est encore beaucoup plus avantageux ; tel est le cas de l'installation représentée par les figures 191 à 194 (chapitres 60 et 62).

Le prix total d'établissement est de 40 000 francs ; l'installation fonctionnant automatiquement, on n'a pas besoin de force motrice ; pour le service il faut 6 ouvriers à $3^{fr},50$ soit une dépense journalière de 21 francs. Avec $3^{fr},10$ par jour on couvre largement les frais de graissage. Pour les réparations et le remplacement des pièces usées, nous admettons par an 6 % du prix de l'installation, c'est-à-dire :

$$\frac{6 \times 40000}{100 \times 300} = 8 \text{ francs par jour.}$$

Les frais totaux journaliers sont donc :

$$21 + 3{,}10 + 8 = 32^{fr},10.$$

La durée des manœuvres nécessaires au transport d'un bloc de la carrière à la station inférieure étant d'une demi-heure, y compris le trajet aérien de 11 minutes, on pourra transporter 16 blocs par journée de 8 heures. Les frais d'une course seront donc de $\frac{32{,}10}{16} = 2^{fr},06$.

Avant l'établissement du chemin aérien, on faisait glisser les blocs sur une pente très raide de la montagne : pour cela on les plaçait sur un chariot en forme de traineau auquel étaient fixés deux câbles en chanvre qui permettaient de freiner et de descendre doucement la charge. Comme tambour de frein, on avait placé de chaque côté du plan incliné de gros troncs d'arbre encastrés dans des massifs de maçonnerie, autour desquels on enroulait plusieurs fois les câbles. Deux ou trois ouvriers étaient employés à maintenir les cordages qu'ils lâchaient peu à peu et lorsqu'un des câbles était arrivé à fin de course, on enroulait aussitôt l'autre sur le tronc d'arbre immédiatement au-dessous. Cinq ouvriers étaient ainsi occupés à la manœuvre des câbles, tandis que d'autres plaçaient des morceaux de bois transversaux au-dessous du chariot. Ce système de transport était très dangereux et on devait donner aux ouvriers un salaire élevé ; de plus, la descente d'un bloc nécessitait une journée entière.

La main-d'œuvre journalière était de 60 francs : 12 ouvriers à 5 francs par jour ; les frais d'entretien du chemin, le bois, les câbles et le savon de graissage revenaient pour chaque course à environ 25 francs, soit une dépense totale de 85 francs. La différence de frais est donc de $85 - 2{,}06 = 82^{fr},84$ par bloc, de sorte que le prix de l'installation entière se trouve remboursé après environ 500 courses,

II. — Transporteurs à va-et-vient

60. Installations à deux voies. — Lorsque le chemin aérien a une longueur relativement petite, un faible débit et une pente suffisante pour

fonctionner sans moteur, on délaisse souvent le système précédemment décrit à mouvement continu dans le même sens. Le câble tracteur contourne alors à la partie supérieure une poulie de frein et dans la station inférieure une poulie tendeuse ; sur ce câble on fixe deux wagonnets de sorte que lorsque l'un deux se trouve dans la station de chargement l'autre est à l'extrémité opposée du transporteur. Le wagonnet plein qui descend remonte le vide, comme dans les plans inclinés de montagne et l'installation est amenée au repos au moyen du frein lorsque les wagonnets arrivent à fin de course.

Les charges sont les mêmes des deux côtés et les câbles porteurs doivent être identiques ; leur diamètre est toutefois plus faible que dans un chemin aérien à câble tracteur en mouvement continu, vu l'espacement des passages des wagonnets. Pour cette dernière raison on doit prendre les caisses de wagonnets plus grandes que dans le cas des transporteurs aériens ordinaires. Avec une charge utile de 500 kilogrammes, on admet ordinairement des câbles porteurs spiroïdaux de 25 millimètres, et, pour une charge de 750 kilogrammes, des câbles de 28 à 30 millimètres de diamètre, selon la fréquence des courses ; leur résistance à la rupture étant 14 500 kilogrammes par cmq. Afin de ne pas trop fatiguer les câbles on ne dépasse généralement pas 500 kilogrammes comme pression de chaque roue ; lorsqu'on a des charges de 750 à 800 kilogrammes, on réunit deux chariots par un levier articulé ou bien on munit les wagonnets d'un nombre de roues suffisant. Dans ces transporteurs, on peut également employer des câbles porteurs de construction close.

La maison Bullivant et C° a établi un chemin aérien de ce genre destiné au transport d'ouvriers et de matériaux pour la construction d'un phare près de Beachy Head. Les câbles porteurs avaient des diamètres différents : le plus gros de $48^{mm},5$ de diamètre servait au transport de pierres dont le poids atteignait jusqu'à 4 000 kilogrammes, l'autre de $44^{mm},5$ servait pour les matériaux plus légers et les ouvriers. Le wagonnet avait 4 roues de sorte que la pression maximum de l'une d'elles était d'environ 1 000 kilogrammes. Le chemin aérien avait une longueur de 180 mètres et une descente de 120 mètres. Dans ce transporteur qui n'était que temporaire, on pouvait admettre une pression de roue un peu élevée, d'ailleurs plus faible sur le petit câble que de l'autre coté. L'ins-

tallation durable construite par Ceretti et Tanfani, représentée par la figure 191, transporte des charges encore plus considérables que la précédente; chaque wagonnet est muni de 8 galets de roulement, la pression de l'un d'eux sur le gros câble est de 750 kilogrammes et sur le petit d'environ 450 kilogrammes.

Ce chemin aérien établi à Carrare est destiné au transport de blocs de marbre allant jusqu'à 5 000 kilogrammes. Le câble supportant les

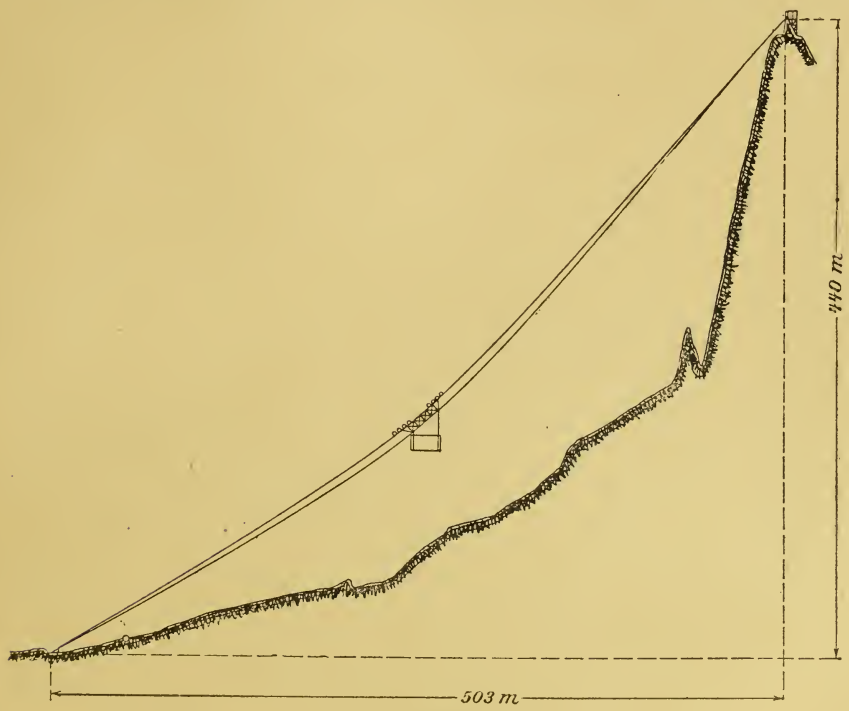


Fig. 191.

charges maxima a un diamètre de 45 millimètres, tandis que l'autre sur lequel ne circulent que des charges inférieures à 2 500 kilogrammes n'a que 30 millimètres.

La vitesse de roulement des wagonnets dépend de l'importance de la charge; dans des conditions moyennes elle est de 3 à 6 mètres à la seconde. Dans certains cas particuliers où les charges sont faibles, elle est de 8 à 10 mètres et atteint même 15 mètres; avec les grosses charges précédentes, elle ne dépasse pas 1 mètre à la seconde.

La plupart de ces chemins aériens automoteurs à va-et-vient n'ont que quelques pylônes près de la station supérieure ; la plus grande partie de la longueur étant effectuée par une seule travée. Les câbles vont souvent de la station supérieure à la station inférieure sans supports intermédiaires ; on a déjà construit de telles installation ayant une portée de 1 250 mètres.

61. Calculs. — En tenant compte du temps nécessaire au chargement, le débit horaire est donné par l'équation :

$$Q = 0{,}9 \frac{P \cdot v}{L} 3\,600 \text{ kilogrammes}$$

dans laquelle P est le poids de la charge utile d'un wagonnet, v la vitesse moyenne à la seconde en mètres, L, la longueur en mètres du chemin aérien. Lorsque L est grand, on peut obtenir un débit presque double sans dépasser la vitesse permise, en divisant la ligne en deux tronçons indépendants au moyen d'une station intermédiaire (voir fig. 196).

Les tensions du câble tracteur sont dans ce cas là très facilement déterminées à l'aide de la figure 29, page 44. Comme forces, on a la composante de la charge $P + p$ parallèle à l'inclinaison de la voie, la composante verticale du poids du câble et la moitié de la traction exercée sur la poulie terminale. La tension maximum est donc ainsi :

$$S_1 = (P + p) \sin \gamma + qh + S.$$

De l'autre côté de la poulie de frein, on a la tension minimum :

$$S_2 = p \sin \gamma + qh + S.$$

L'effort maximum que l'on devra exercer au frein sera donc :

$$N = \frac{S_1 - S_2)\, v'}{75} = \frac{Pv'}{75\sqrt{1 + \frac{l^2}{h^2}}} = \frac{Pv'}{75}\left(1 - \frac{h^2}{2l^2}\right)\frac{h}{l}$$

si v' représente la vitesse maximum admissible par seconde en mètres.

62. Stations terminales. — Dans ce genre de chemins aériens, les sta-

tions terminales peuvent être exécutées très simplement; la figure 192

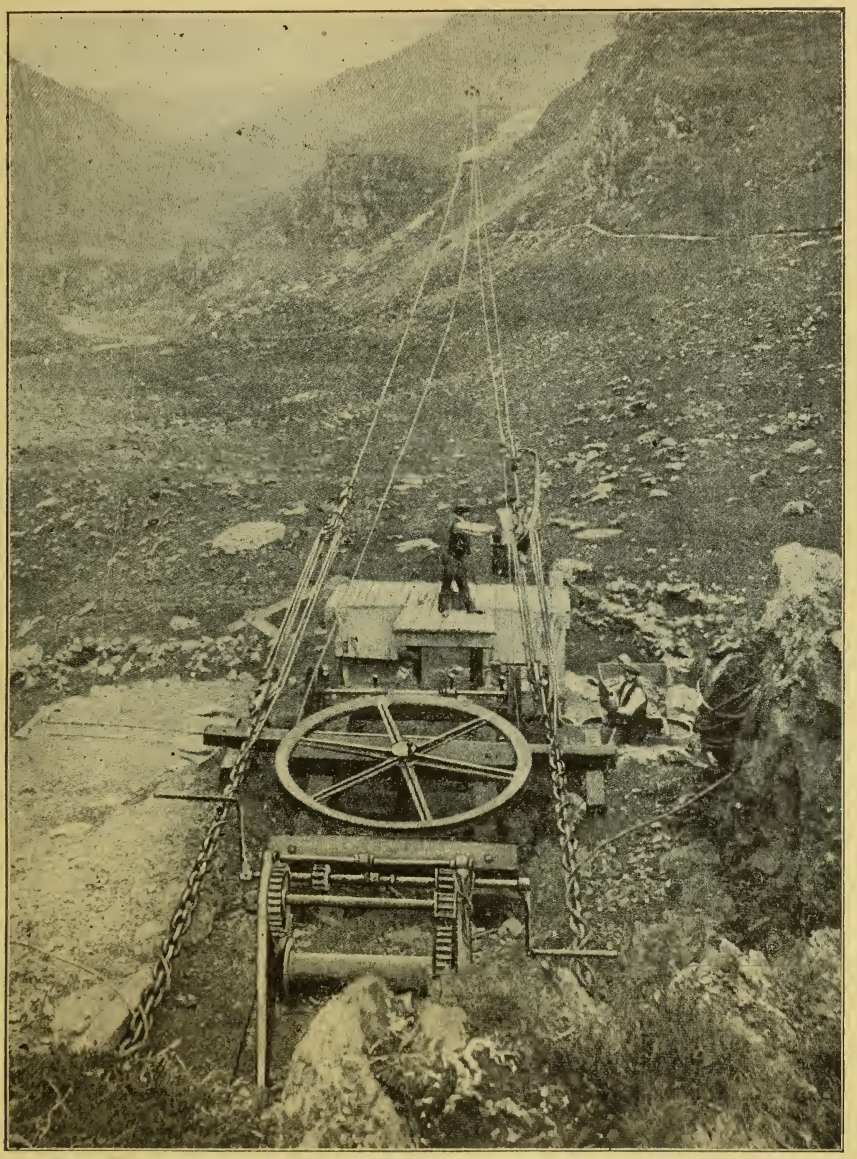


Fig. 192.

montre la station inférieure d'une installation construite par la maison

Bullivant et C° dans les Pyrénées ; ce transporteur a une longueur de 640 mètres avec une pente moyenne de $\frac{1}{6}$.

Les câbles porteurs sont reliés au moyen de palans à deux chaînes ancrées dans le sol et les variations de tensions sont rattrapées à l'aide d'un treuil à bras placé derrière la station inférieure. Les wagonnets aériens s'arrêtent tout près du point d'attache des palans et les ouvriers montés sur un petit plancher les vident dans des wagonnets à voie étroite situés au-dessous. Pour le câble tracteur, il n'a été prévu aucun dispositif de

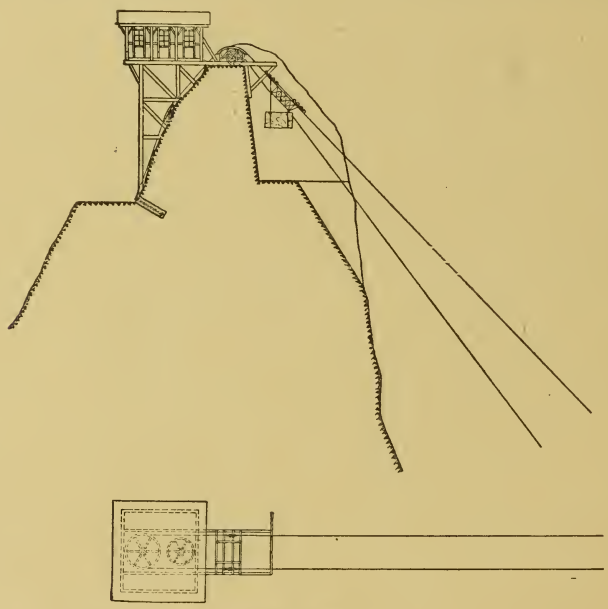


Fig. 193.

tension, ses variations de longueur et de flèche n'ayant aucune importance.

Les stations du chemin aérien de ce genre installé par la maison Ceretti et Tanfani à Carrare sont tout à fait spéciales ; la figure 193 montre la station de départ. Les câbles porteurs sont écartés de $2^m,50$ et ancrés dans la station supérieure, ils traversent une tranchée de 3 mètres à $4^m,50$ et sont destinés à amener les blocs dans la station inférieure. Au-dessus de la station de chargement se trouve une poutre en I sur laquelle roule un

palan qui amène les charges d'un camion aux wagonnets aériens. Les blocs sont suspendus au chariot au moyen de câbles (fig. 194).

Le frein de la station supérieure est représenté par la figure 195. Le câble tracteur fait deux fois le tour de la poulie à double gorge à l'aide d'une poulie de renvoi légèrement inclinée. Comme sécurité on a prévu deux freins, mais un seul suffit pour arrêter la charge et la maintenir au

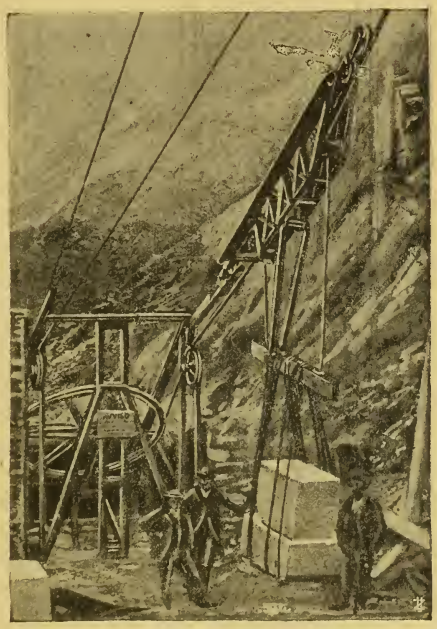


Fig. 194.

repos. Ces deux freins, dont les bandes sont garnies de petits tasseaux de fonte, fonctionnent généralement ensemble. Ils sont commandés chacun au moyen d'un volant, d'une roue et vis sans fin et d'un train d'engrenages cylindriques ; sur chaque tige des volants se trouve calé un tambour, et un contre poids agissant sur lui par l'intermédiaire d'un câble tend constamment à amener le frein dans sa position de serrage. Le desserage est obtenu en soulevant le contrepoids qui bloque automatiquement le frein dès que l'ouvrier pour une raison quelconque abandonne le volant de commande. La troisième poulie de frein calée sur le même arbre ver-

tical ne sert qu'en cas d'avarie de l'une des autres ; pour augmenter son frottement on a garni sa bande de tasseaux de bois. L'excédent total de force à freiner est de 40 HP.

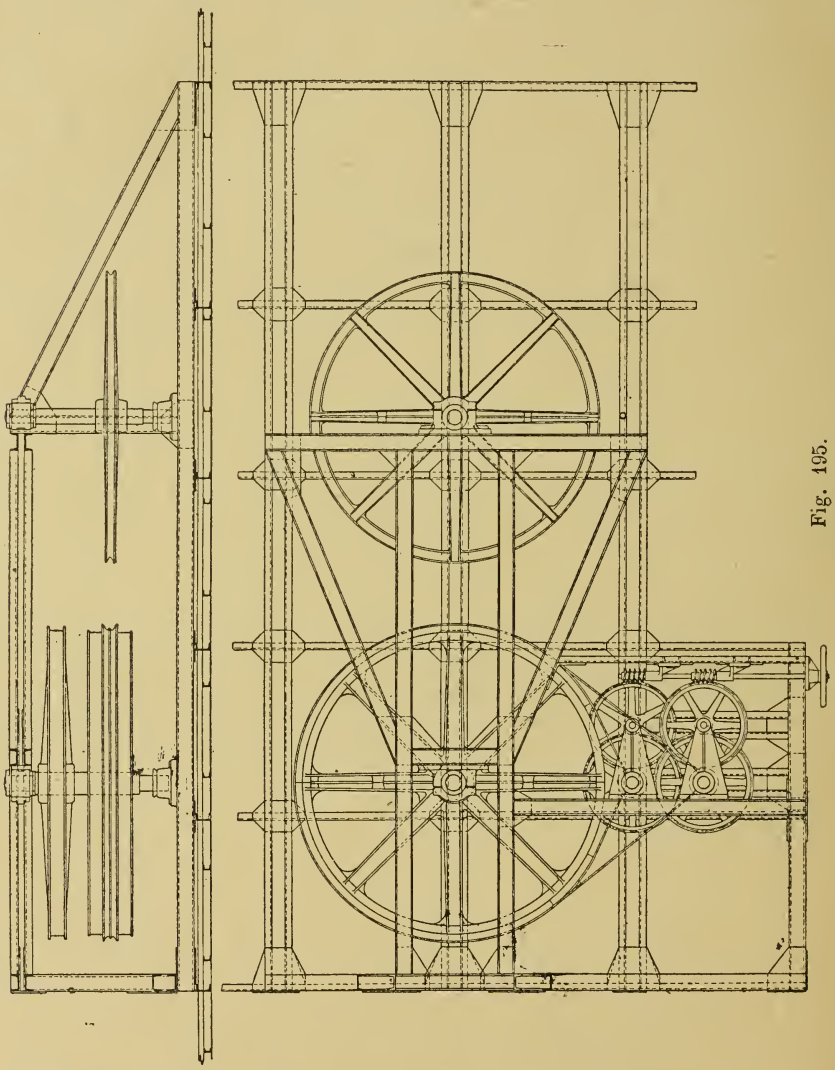


Fig. 195.

Le câble tracteur est tendu dans la station inférieure au moyen de deux vis, et la poulie de renvoi de cette station peut être déplacée de $1^{m},50$.

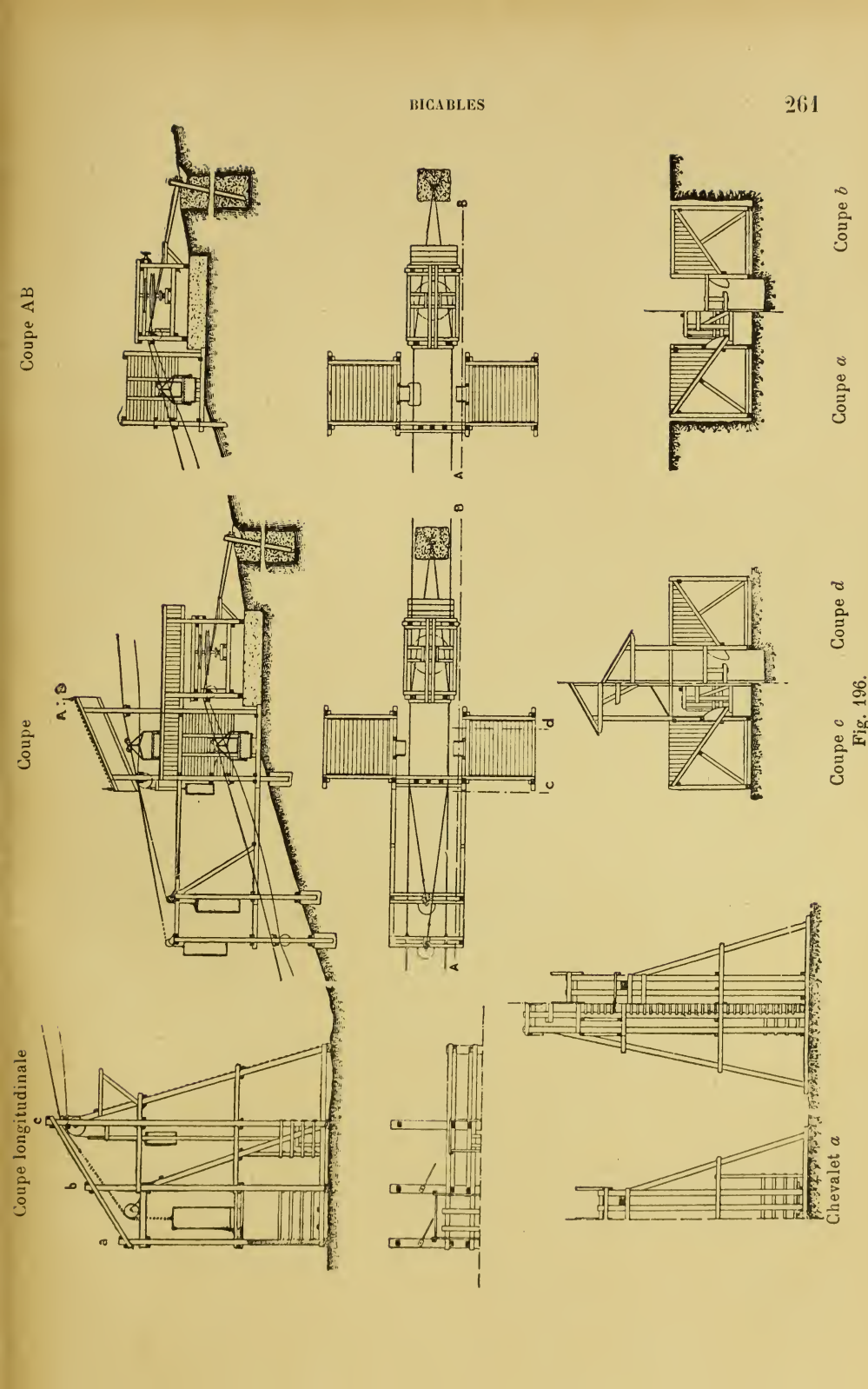

Coupe longitudinale
Coupe
Coupe AB
Coupe a
Coupe b
Coupe c
Coupe d
Chevalet a

Fig. 196.

Lorsque la matière à transporter est en morceaux, on opère souvent le chargement au moyen de trémies et le vidage en culbutant automatiquement les wagonnets en plein air. La figure 196 montre les stations d'un chemin aérien à va-et-vient de Ceretti et Tanfani qu'on a été obligé de sectionner en deux parties à cause de sa grande longueur de 3000 mètres. Le chargement, à la station supérieure et à la station intermédiaire, se fait par des trémies ; celles qui sont au milieu du transporteur sont remplies directement par les wagonnets aériens du premier tronçon. Pour réduire autant que possible la longueur des stations, on a disposé les poulies tendeuses dans des plans verticaux. Le débit horaire de l'installation est de 5 tonnes de pierres calcaires avec un wagonnet d'une

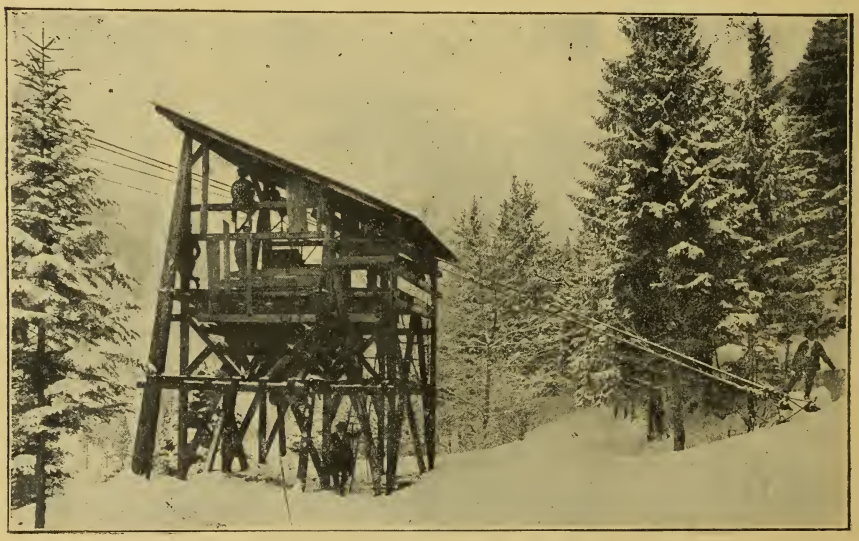


Fig. 197.

contenance de 750 kilogrammes pour la grande section supérieure et 600 kilogrammes pour la section inférieure. La vitesse moyenne est de 4 mètres à la seconde.

La figure 197 montre la station de déchargement avec ancrages d'un va-et-vient construit dans la haute montagne par la Maison Neyret-Brenier et Cie. Cette station entièrement en bois renferme une trémie dans laquelle viennent se culbuter automatiquement les wagonnets aériens servant au transport de terres réfractaires.

63. Transporteurs à voie de roulement unique. — Lorsque la ligne est très courte et le débit peu important, on emploie encore parfois un système de transporteur plus simple que le précédent, qui comporte seulement un câble porteur sur lequel roule un wagonnet et plus rarement plusieurs wagonnets à de courtes distances les uns des autres. L'entraînement se fait au moyen d'un câble tracteur tournant dans un sens pour le transport des matériaux et en sens inverse pour le retour des wagonnets. Ordinairement la ligne est très inclinée et le retour

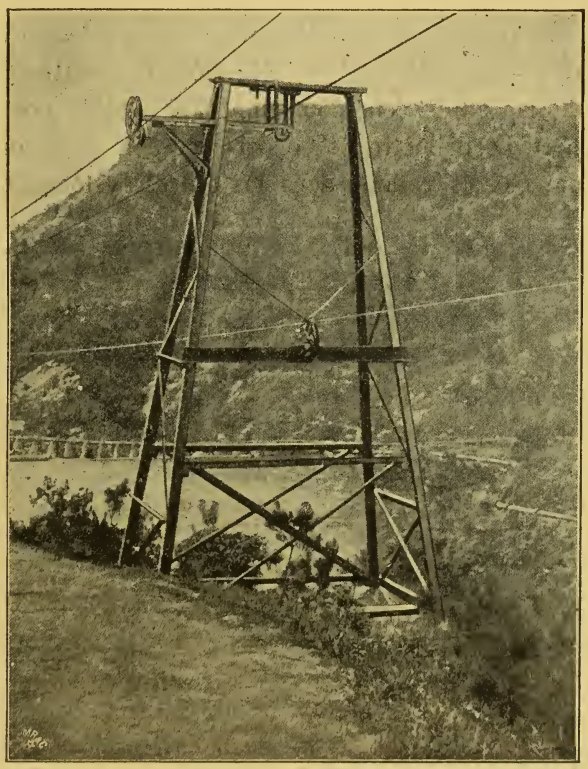


Fig. 198.

s'opère automatiquement avec deux freins de réglage disposés dans la station supérieure. Le mouvement ascendant des wagonnets s'obtient soit au moyen d'un petit treuil à bras, soit au moyen d'un moteur; dans ce dernier cas la vitesse moyenne pendant la montée est

$v_1 = 1^m,50$ à $2^m,50$ à la seconde et à la descente automatique $v_2 = 4$ à 6 mètres à la seconde selon le débit horaire que l'on doit atteindre.

En tenant compte du temps nécessaire au chargement et au déchargement, le débit qu'on peut obtenir avec un wagonnet ou une série de wagonnets contenant une charge de P kilogrammes est donné par l'égalité :

$$Q \backsim (0,7 \text{ à } 0,8) \frac{3,6\,P}{L\left(\frac{1}{v_1} + \frac{1}{v_2}\right)} \text{ tonnes à l'heure.}$$

La figure 198 représente un pylône d'un transporteur à voie unique, avec ses guidages du câble tracteur. Ce pylône de construction particulière porte un dispositif spécial pour empêcher le câble porteur de quitter son support. Le diamètre de ce dernier câble et la contenance du wagonnet sont choisis comme dans les autres systèmes de transporteurs aériens.

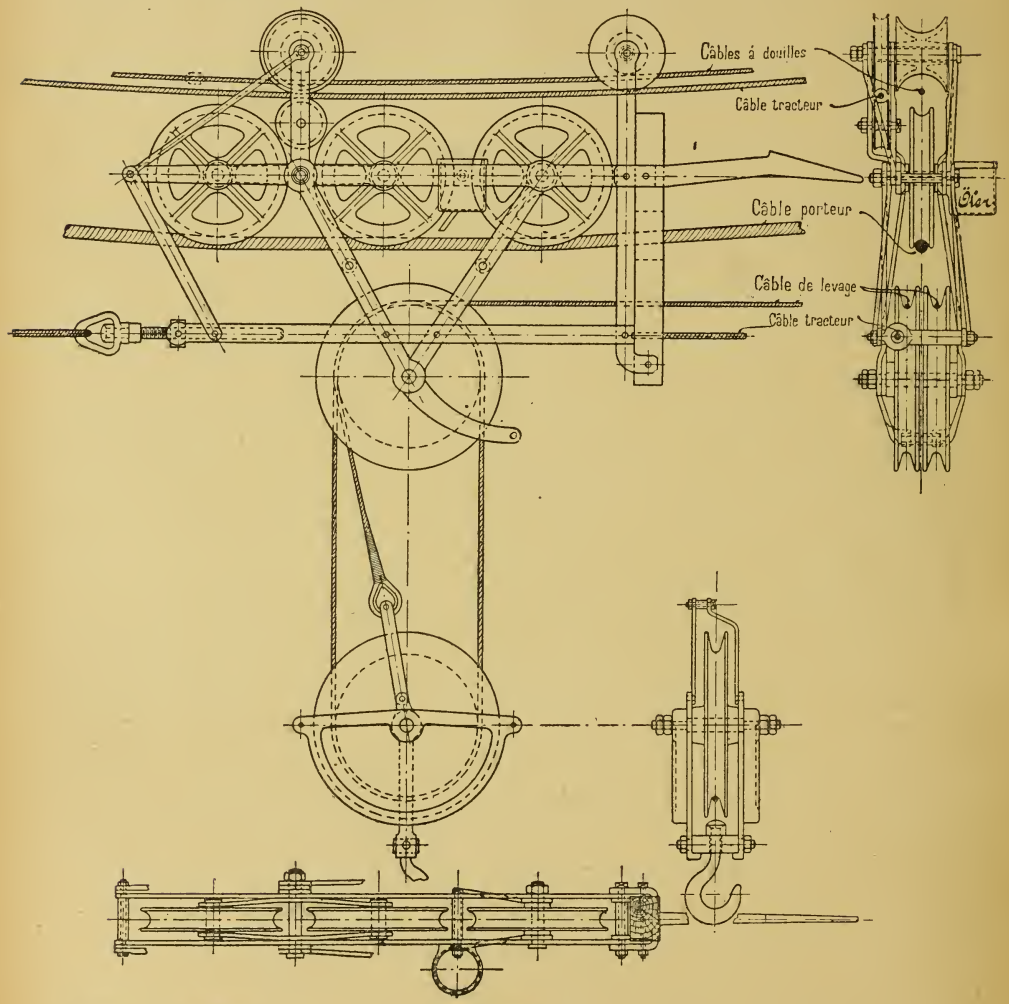
D. — BLONDINS

64. Installations fixes. — Les installations dénommées presque partout blondins sont une variante spéciale des chemins de fer aériens que l'on peut employer lorsque les frais d'installation doivent être peu élevés. Ces constructions portent le nom de leur inventeur, l'Américain Blondin.

Un blondin n'est autre chose qu'un chariot roulant dont le chemin de roulement est formé par un ou deux câbles au lieu d'être rigide. Le câble porteur est ancré d'un côté et maintenu à une tension constante par un palan ou un contrepoids disposé à l'autre extrémité. Dans la plupart des constructions de ce genre, au-dessus des voies de roulement se trouve un câble tracteur qui commande la translation du chariot et un câble de levage qui permet de monter ou de descendre la charge, tous les deux étant mis en mouvement par un même treuil.

La figure 199 montre un chariot de Ceretti et Tanfani pour charges moyennes ayant une vitesse de translation de $2^m,50$ à la seconde. Il comprend trois galets de roulement, deux poulies de mouflage pour le câble de levage et un petit rouleau-guide du brin supérieur du câble tracteur. Au-dessus de la voie de roulement se trouve un câble portant des douilles de différentes grosseurs, qui est maintenu en position par les deux petites poulies supérieures du chariot. Les douilles de ce câble maintiennent en place pendant le retour du chariot les supports métalliques qui ont été entraînés à l'aller par le bras en porte-à-faux de l'appareil et qui sont destinés à empêcher une trop grande flèche du câble tracteur. Lorsque cette dernière n'est pas nuisible, on supprime naturellement les supports

métalliques dont l'accrochage détermine toujours des petits chocs qui obligent à maintenir la vitesse de translation assez faible. Dans le cas d'une grande vitesse de translation, jusqu'à 5 mètres à la seconde, Ad. Blei-



Öler = graisseur Fig. 199.

chert et C° disposent de chaque côté de la voie de roulement deux autres câbles qui supportent des morceaux de bois servant d'appui au câble tracteur.

Ce genre de construction est très employé comme engin de montage

lorsqu'on a une grande longueur et une faible largeur à desservir et quand le terrain n'est pas régulier. Depuis quelque temps, on s'en sert également de plus en plus comme installation fixe. La figure 200 représente une installation caractéristique de la maison Neyret-Brenier et Cie qui diffère de celles employées généralement pour de faibles charges et de courtes portées, par son chemin de roulement formé de deux câbles distants de $0^m,60$.

Les câbles porteurs sont ancrés dans la station près de l'usine et tendus par des contrepoids placés à la tête du pylône incliné situé sur le bord de l'eau. Ce transporteur a une longueur totale de 175 mètres et, pour diminuer la flèche, on a disposé un pylône au milieu. Des voies suspendues qui viennent se raccorder à la station terminale emmènent la matière jusqu'à l'intérieur de la fabrique.

Le chariot représenté (fig. 201) se compose de deux solides flasques en tôle portant à l'extérieur les galets de roulement garnis de caoutchouc. Tout près de ces derniers se trouvent d'autres petits galets qui maintiennent l'écartement des câbles porteurs constant et empêchent ainsi le chariot de quitter son chemin de roulement. Pendant le fonctionnement, la charge n'est pas suspendue au câble tracteur qui commande en même temps deux mouvements, la moufle est supportée par le levier en forme de crochet, et le câble complètement déchargé fatigue par suite très peu. Le poids d'un tel chariot peut être en toute sécurité égal aux $\frac{2}{10}$ de la charge ; pour une charge de 2000 kilogrammes, par exemple, Ad. Bleichert et Co emploient un chariot de 365 kilogrammes.

Le treuil est ordinairement à trois tambours et l'arbre est commandé par un moteur électrique par l'intermédiaire de deux trains d'engrenages droits. Les tambours sont fous sur l'arbre et peuvent être rendus solidaires de celui-ci au moyen d'embrayages à friction : sur un des petits s'enroule le câble de levage avec une vitesse de $0^m,75$ à 1 mètre à la seconde et même $1^m,50$ lorsque les charges sont faibles ; sur chacun des deux autres est fixée l'extrémité du câble de translation dont la vitesse varie, suivant la longueur du transporteur et le débit, de $1^m,50$ à 5 mètres à la seconde. Chaque tambour est venu de fonderie avec une poulie de frein sur laquelle s'enroule une bande d'acier garnie de tas-

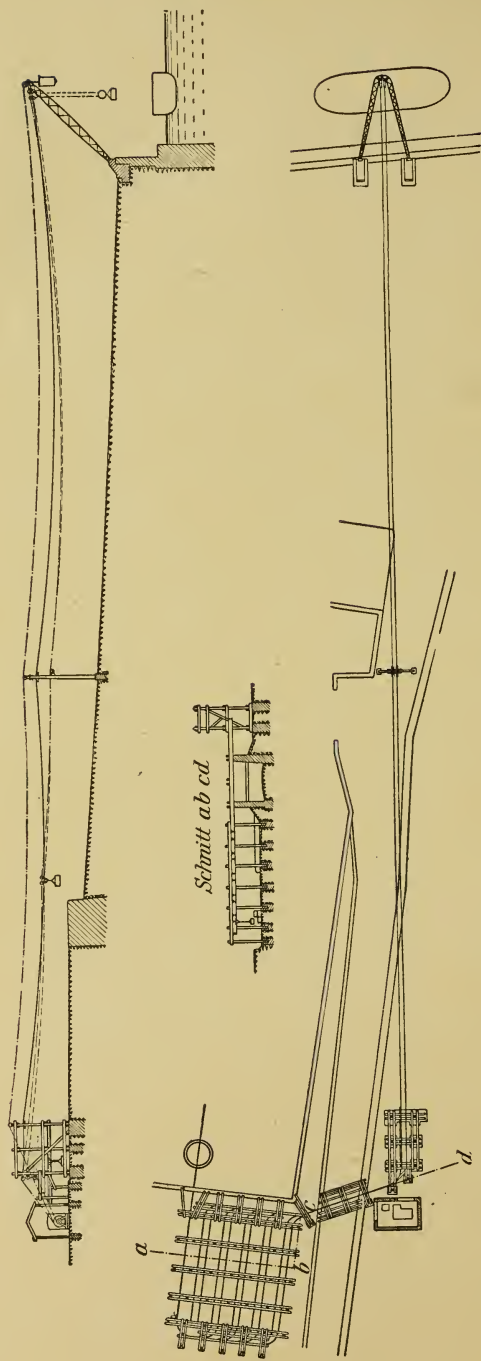


Fig. 200.

Schnitt = Coupe.

seaux de bois, cette dernière est serrée automatiquement aussitôt que l'accouplement est débrayé. Des dispositifs spéciaux combinés avec les

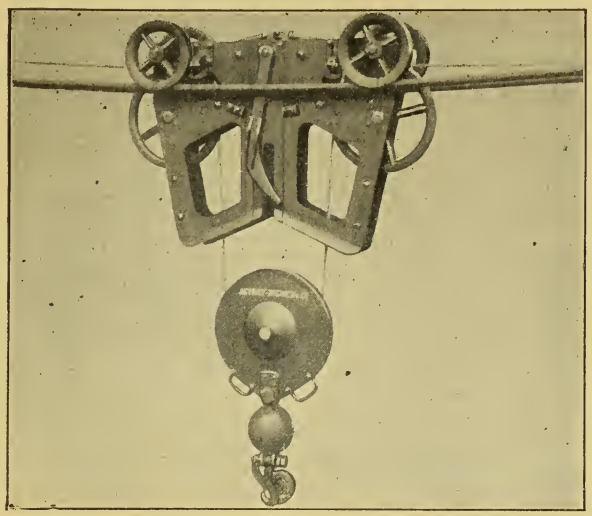


Fig. 201.

tambours du câble de levage et du câble de translation indiquent à chaque instant la position de la charge.

Les treuils de ce genre sont assez lourds ; pour un moteur de 75 HP. ils pèsent suivant la construction de 3500 à 4000 kilogrammes. Ceretti

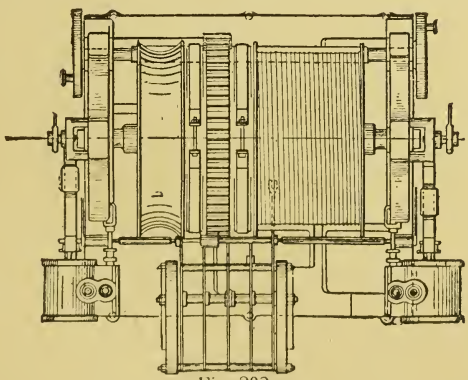


Fig. 202.

et Tanfani ont simplifié leur construction en enroulant plusieurs fois le câble de translation sur une poulie à large gorge ; la figure 202 montre un treuil de cette maison avec commande par machines à vapeur.

Les câbles porteurs sont la plupart du temps de construction close ; on emploie cependant quelquefois des câbles d'un autre genre de construction. Leur diamètre est calculé de bien des façons différentes ; on se sert souvent du graphique représenté figure 70, chapitre 35 de telle sorte que, pour une charge de 2 000 kilogrammes sur deux galets, le diamètre du câble porteur de construction close est de 40 millimètres ; il croît d'environ 5 à 6 millimètres pour chaque augmentation de charge de 500 kilogrammes. Toutefois, dans les installations provisoires de montage qui ont une assez courte durée, on augmente souvent ces charges.

On a déjà construit des blondins ayant une portée de 450 mètres. Dans ce cas on doit naturellement avoir les pylônes d'extrémités très élevés à cause de la grande flèche des câbles qui ne peuvent pas dans ces constructions être aussi fortement tendus que dans les chemins aériens ordinaires.

Pour simplifier ce genre d'installation, on fixe les deux extrémités des câbles porteurs à la charpente des pylônes en forme d'A. Dans ce cas, la flèche doit tout d'abord être choisie telle que la tension horizontale H ne dépasse pas la valeur admise, sous l'action de la charge maximum. La pente que le chariot doit monter est alors constante quel que soit son poids et, avec de faibles charges, on a une dépense inutile de courant.

Cette raison a conduit à l'emploi de plus en plus fréquent du pylône articulé représenté par les figures 200 ; si on désigne par :

α, l'angle que fait le pylône avec la verticale ;

d, la longueur du pylône ;

l, la corde horizontale des câbles ;

G_0, le poids du pylône ayant son point d'application au milieu ;

G, le contrepoids agissant au sommet ;

q, le poids des câbles porteurs pour 1 mètre de portée ;

P_0, le poids du chariot ;

P, le poids de la charge ;

H, la traction horizontale exercée par les câbles dans le pylône ;

on a au point d'articulation du support, l'équation des moments suivante :

$$Hd \cos \alpha = Gd \sin \alpha + G_0 \frac{d}{2} \sin \alpha + \frac{1}{2} (ql + P_0 + P)\, d \sin \alpha$$

H, étant constante on tire de l'égalité précédente la valeur de l'inclinaison du support :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{H}{G + \frac{1}{2} G_0 + P_0 + P + ql};$$

dans l'établissement de cette formule on a naturellement négligé le frottement de l'axe d'articulation et les autres forces secondaires. Plus la charge P augmente, plus le pylône articulé se relève, avec une faible charge et quand le chariot arrive près de l'extrémité, le câble se rapproche davantage de l'horizontale que dans l'ancienne construction avec supports en forme d'A. On choisit généralement G et H de façon à ce que l'égalité ci-dessus donne comme valeur moyenne $\alpha = 45°$. La valeur maximum de cet angle est donnée lorsque la quantité $\frac{1}{2}$ $(P_0 + P)$ du dénominateur est négative et la valeur minimum lorsque cette quantité est positive.

65. Installations mobiles. — Les blondins sont tout indiqués pour la mise en tas et la reprise de la matière lorsque les deux stations peuvent

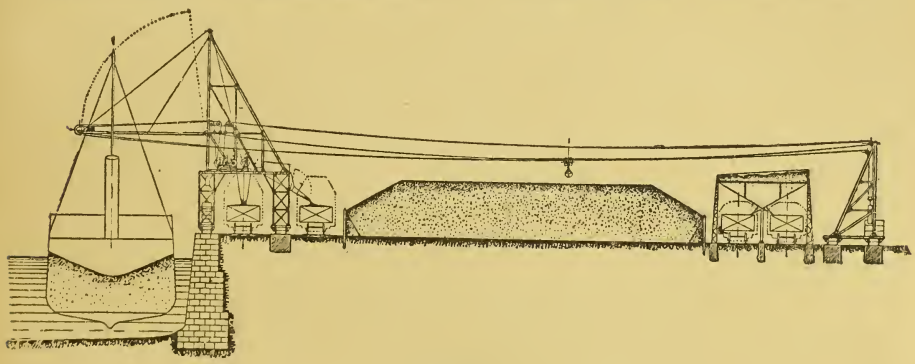


Fig. 203.

être déplacées. La figure 203 montre un projet d'une installation de ce genre établi par Ceretti et Tanfani. Le treuil est installé sur la charpente supportant un bras articulé et relevable pour permettre d'éviter les mâts des bâteaux. Le chariot peut amener directement au moyen de couloirs, le charbon ou le minerai dans les wagons de la voie ferrée placée avant le dépôt. Les matières qui ne peuvent pas être directement rechargées sont mises en tas d'une façon tout à fait régulière en vidant automatiquement le

wagonnet en un endroit quelconque. La reprise s'effectue à l'aide d'une benne preneuse à câble unique qui amène la matière dans des trémies transbordeuses et de là dans les wagons des lignes situées derrière le dépôt.

La stabilité du support est obtenue au moyen de contrepoids disposés dans la partie inférieure. Le câble porteur est fixé dans la station par un palan que l'on relâche au moment de la translation de tout le transporteur.

66. Installations commandées du chariot. — Pour le déchargement de bateaux, la mise en tas régulière et la reprise, la commande est relativement facile et la disposition de la figure 203 est tout indiquée. Dans le cas d'une installation de montage, la manœuvre est tout autre et l'accord le plus parfait doit exister entre les ouvriers du chantier et le conducteur du transporteur. Pour obtenir un tel résultat, on place généralement ce dernier dans une cabine solidaire du chariot, d'où il peut commander le levage et souvent aussi le déplacement du wagonnet.

De ce fait, l'arrivée de courant jusqu'au moteur est naturellement plus compliquée et la construction plus lourde ; dans le cas de charges moyennes, le poids du chariot est environ le double de celui de la charge utile.

La première installation de ce genre a été construite par M. Henderson et C° à Aberdeen pour les chantiers de Palmers Shipbuilding and Iron Co à Yarrow sur Tyne [1]. Elle est formée par deux portiques inclinés articulés et réunis entre eux par deux câbles de 141 mètres de longueur ; le tout est maintenu par des haubans latéraux ancrés dans le sol. Chaque portique est constitué par deux colonnes en treillis de 30 mètres de longueur, écartées de 30 mètres et réunies à leur partie supérieure par deux doubles poutres demi-paraboliques. Entre les deux poutres se trouve le chemin de roulement de trois chariots électriques auxquels sont fixées les extrémités des câbles porteurs des transporteurs aériens. Les câbles porteurs sont à torons ; ils ont un diamètre de $62^{mm},5$, une résistance à la rupture de 17 500 kilogrammes par centimètre carré et prennent sous une charge utile de 3 tonnes une flèche de

---

[1] Z. d. V. d. Ing. 1906, page 962.

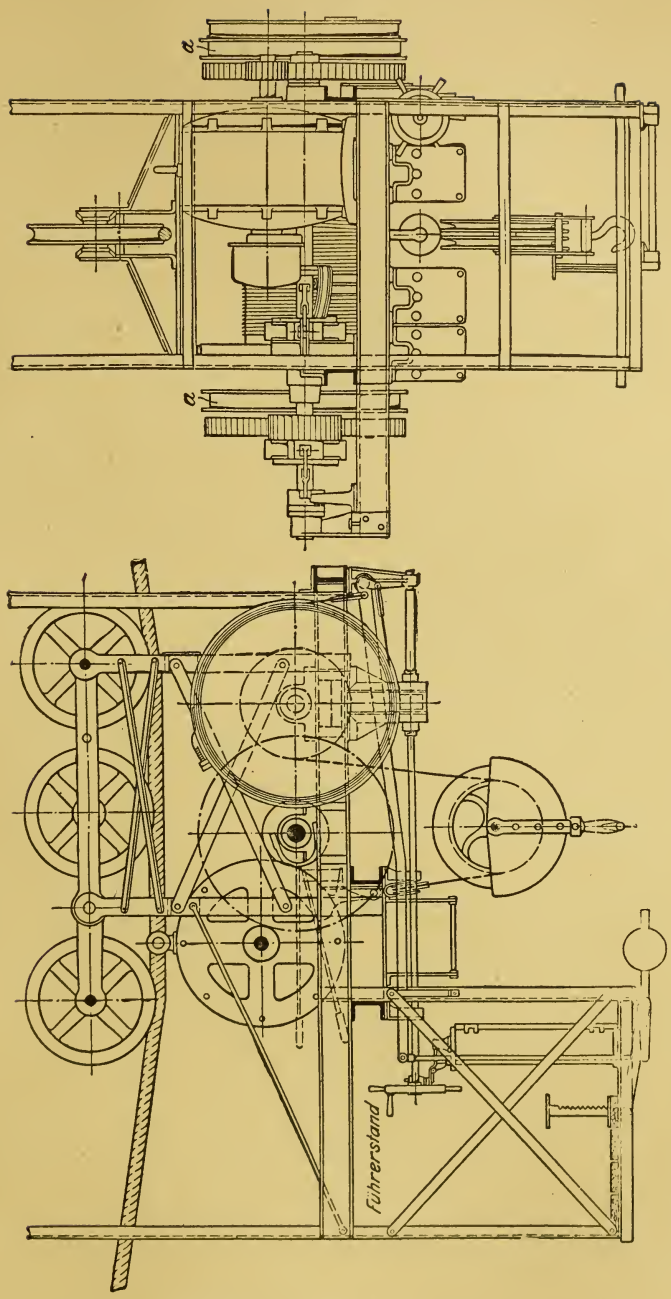


Fig. 204.

Führerstand = Conducteur

$5^m,50$. Les chariots des extrémités sont munis de galets verticaux et horizontaux, et commandés par un moteur électrique de 12 HP. ; afin d'obtenir un mouvement simultané aux deux extrémités, la manœuvre s'opère de la cabine au moyen d'un controller unique.

Les wagonnets des transporteurs aériens représentés par la figure 204. sont également électriques. Chacun d'eux est muni d'un moteur de 35 HP. qui commande le tambour de levage et les deux poulies de translation *a* sur lesquelles viennent s'enrouler les câbles tracteurs. Les freins du levage et de la translation des wagonnets sont commandés à la main et au moyen de pédales par le conducteur placé dans la cabine. La vitesse de roulement des chariots sur câble est de 3 mètres à la seconde, la vitesse de levage de $0^m,50$ sous 3 tonnes et $0^m,70$ avec une charge de une tonne. Le déplacement des chariots entre les poutres des portiques se fait à une vitesse de $0^m,127$ à la seconde.

FIN

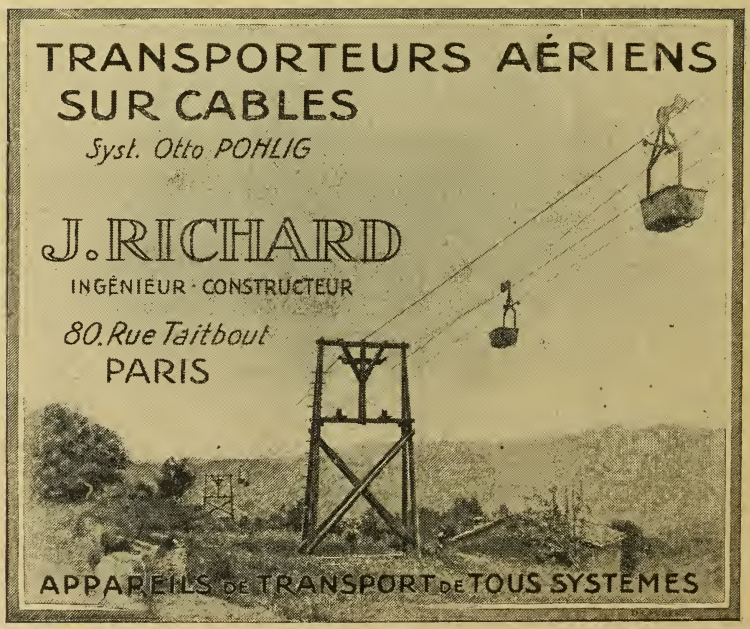


TABLE DES MATIÈRES

A. — GÉNÉRALITÉS

I. — Les premières installations et les différents systèmes de chemins de fer aériens

Pages

1. — Les anciens bicâbles et monocâbles 1
2. — Les blondins 9
3. — Telphérage ; voies suspendues électriques 9

II. — Les câbles et leurs raccords

4. — Les câbles spiroïdaux 10
5. — Câbles clos (ancienne construction) 13
6. — Câbles Simplex 15
7. — Câbles clos (nouvelle construction) 16
8. — Câbles demi-clos 16
9. — Raccords 18
10. — Câbles tracteurs 20
11. — Câbles à torons aplatis et triangulaires 22

III. — Théorie et calcul d'un câble tendu

12. — Equilibre et résistance d'un câble 25
13. — Arc de parabole 29
14. — Influence du vent 33
15. — Influence des wagonnets 35
16. — Longueur du câble 38
17. — Effort de tension du câble tracteur 41
18. — Effort moteur 48

IV. — Fatigue réelle des câbles

19. — Câbles spiroïdaux 51
20. — Les câbles à torons 77

B. — MONOCABLES

I. — Transporteurs Système Hodgson

Pages
21. — Accouplement des wagonnets au câble 87
22. — Fatigue et diamètre au câble 89
23. — Pylônes sur le parcours 91
24. — Tracé de la ligne 93
25. — Stations terminales 96
26. — Vitesse du câble et du débit 97
27. — Tension du câble et commande 100

II. — Transporteurs système Roe

28. — Appareils d'accouplement aux wagonnets 103
29. — Pylônes 107
30. — Tracé de la ligne 109
31. — Stations terminales 110
32. — Données spéciales de construction 113

III. — Transporteurs avec wagonnets fixés au câble

33. — Détails de construction 116
34. — Force motrice et commande 118

C. — BICABLES

I. — Transporteurs avec deux voies de roulement et un câble tracteur en mouvement continu

35. — Câbles porteurs 122
36. — Coussinets d'appui 124
37. — Pylônes 126
38. — Rouleaux porteurs du câble tracteur 137
39. — Tendeurs des câbles porteurs 139
40. — Chariots de roulement des wagonnets 144
41. — Suspensions des wagonnets 148
42. — Caisses des wagonnets 150
43. — Appareils d'accouplement 157
44. — Stabilité des wagonnets 179
45. — Tracé de la ligne 190
46. — Stations d'angle 193
47. — Stations terminales 197

Pages
48. — Stations intermédiaires 204
49. — Vitesse du câble tracteur 208
50. — Diamètre du câble tracteur et force motrice 209
51. — Ponts-abris et filets protecteurs. 215
52. — Rails suspendus 225
53. — Aiguilles des voies suspendues 228
54. — Voies aériennes pour le transport de déchets. 233
55. — Voies suspendues des stations terminales 238
56. — Voies suspendues pour dépôts. 240
57. — Dépôts avec ponts spéciaux 245
58. — Transporteurs aériens pour le chargement des hauts fourneaux . . 249
59. — Frais d'établissement et amortissement. 250

II. — Transporteurs à va-et-vient

60. — Installations à deux voies. 253
61. — Calculs 256
62. — Stations terminales 256
63. — Transporteurs à voie de roulement unique 263

D. — BLONDINS

64. — Installations fixes. 265
65. — Installations mobiles. 271
66. — Installations commandées du chariot 272

Fig. 1.

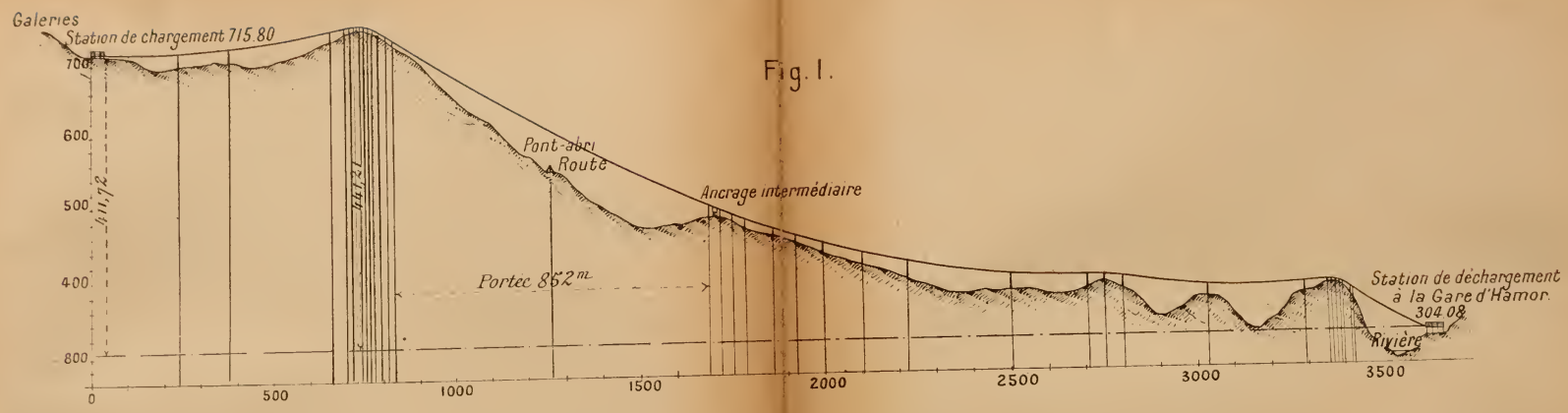


Fig. 2

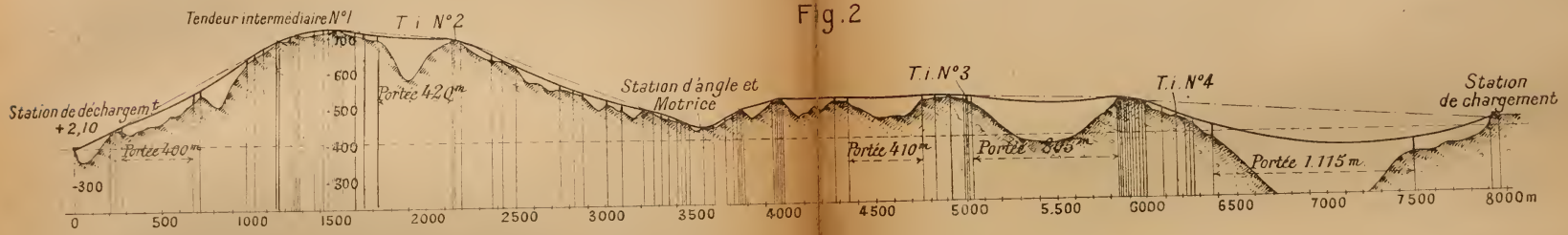


Fig. 3.

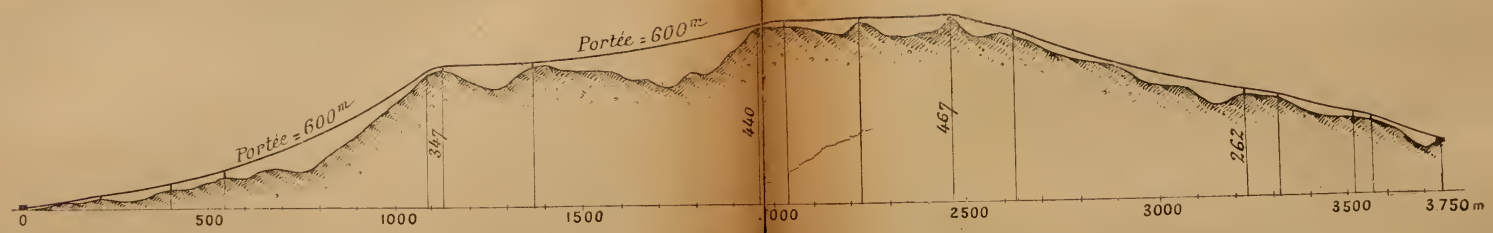
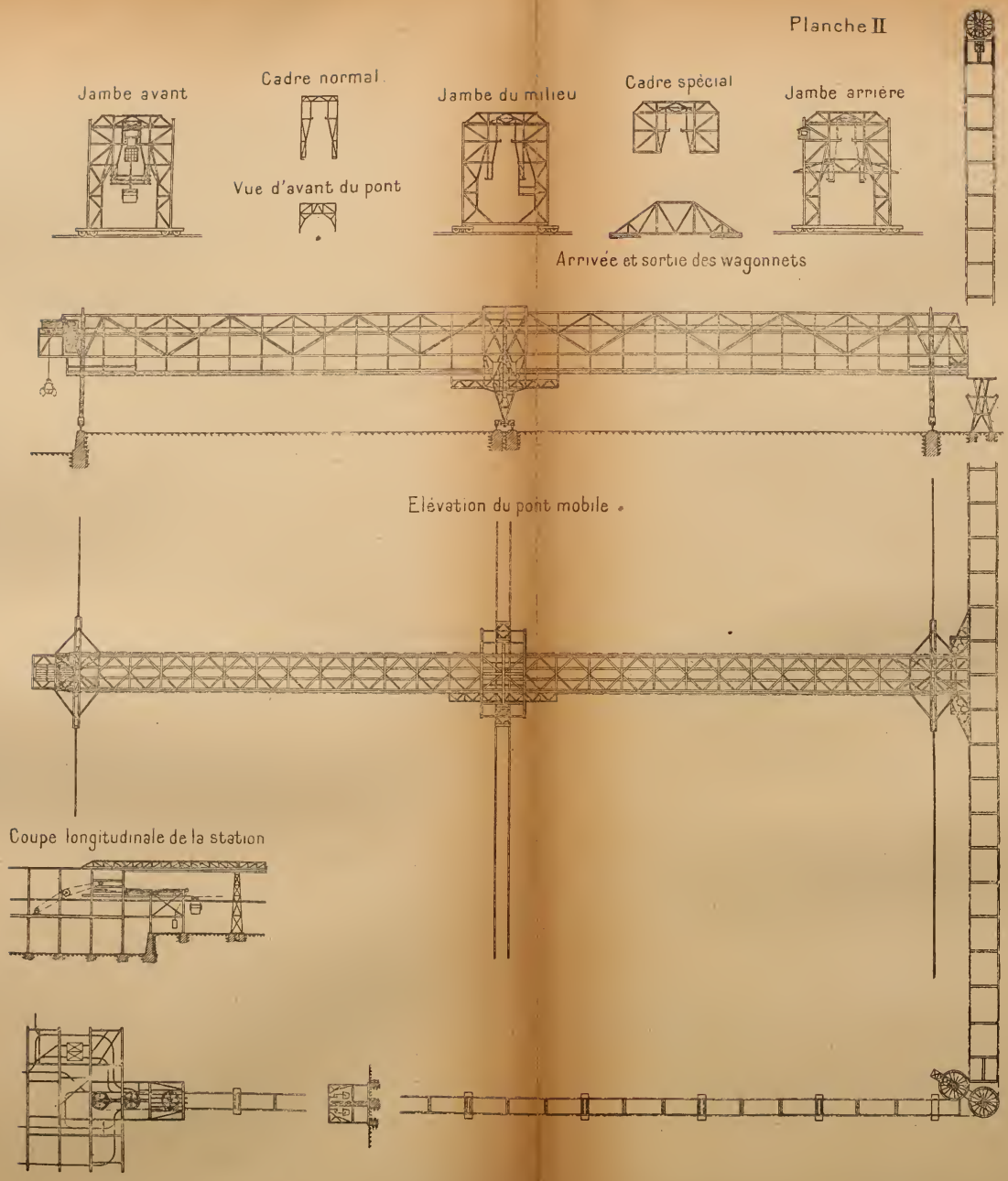


Planche II


Jambe avant
Cadre normal
Vue d'avant du pont
Jambe du milieu
Cadre spécial
Jambe arrière
Arrivée et sortie des wagonnets
Elévation du pont mobile
Coupe longitudinale de la station

G.E.STECHERT
& Co.
NEW YORK

UNIVERSITY OF ILLINOIS-URBANA
3 0112 071165754